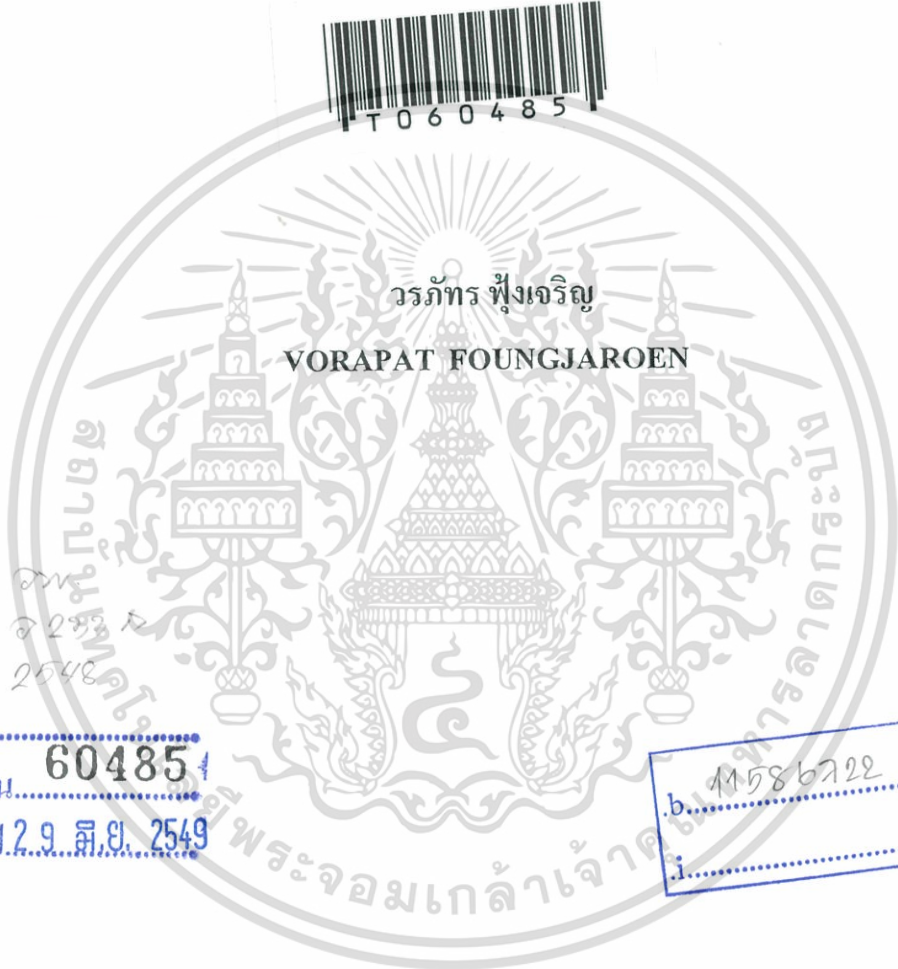


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบที่เหมาะสมของแบร็ริงเพลากลมหล่อลื่นด้วยน้ำมันปาล์ม

DESIGN OF OPTIMAL JOURNAL BEARING LUBRICATED WITH
PALM-BASED OIL



วรภัทร ฟุ้งเจริญ

VORAPAT FOUNGJAROEN

อภ
จ 2๒๕
2548

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 60485
วัน,เดือน,ปี 2.9 ส.ย. 2549

b..... 11586722
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1715-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DESIGN OF OPTIMAL JOURNAL BEARING LUBRICATED WITH
PALM-BASED OIL**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2005

ISBN 974-15-1715-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบที่เหมาะสมของเบร้งเฟลากลมหล่อลื่นด้วยน้ำมันปาล์ม
นักศึกษา	นายวรภัทร ฟูงเจริญ
รหัสประจำตัว	43062035
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบโดยวิธีออฟติไมด์เซชันสำหรับเบร้งเฟลากลมหล่อลื่นด้วยน้ำมันปาล์ม โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนของน้ำมันปาล์มได้จากการทดลอง สมการเรย์โนลด์และสมการพลังงานถูกประยุกต์ภายใต้ทฤษฎีเพาเวอร์ลอร์กำหนดสมการประยุกต์ที่ได้เชิงตัวเลขเพื่อหาพฤติกรรมการหล่อลื่นในเบร้งเฟลากลม ทำให้ได้การกระจายแรงดันและการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมัน การออกแบบเบร้งเฟลากลมโดยวิธีออฟติไมด์เซชันใช้ข้อมูลที่ได้จากการกระจายแรงดันเพื่อกำหนดอัตราการไหล และการกระจายอุณหภูมิเพื่อหาผลต่างอุณหภูมิ กำหนดสมการวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนระยะระหว่างเพลากับเบร้งต่อรัศมีของเพล่า และอัตราส่วนความยาวเบร้งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเพล่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าอัตราการไหลและผลต่างอุณหภูมิต่ำที่สุด กำหนดสมการวัตถุประสงค์ร่วมกับสมการเงื่อนไขบังคับด้วยโปรแกรมเอ็กซ์ซอลทีปเสริช ร่วมกับวิธีอินไคเร็กเสริช โดยกำหนดค่าอัตราส่วนระยะระหว่างเพลากับเบร้งต่อรัศมีของเพล่า และอัตราส่วนความยาวเบร้งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเพล่าเป็นตัวแปรออกแบบของสมการวัตถุประสงค์ นำขนาดของเบร้งที่คำนวณได้จากวิธีออฟติไมด์เซชันเป็นขนาดเบร้งในการทดลอง เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง

Thesis Title	Design of Optimal Journal Bearing Lubricated with Palm-Based Oil
Student	Mr. Vorapat Founjaroen
Student ID.	43062035
Degree	Master of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2005
Thesis Adviser	Assoc.Prof. Mongkol Mongkolwongrojn

ABSTRACT

This thesis presents the design of optimal journal bearing lubricated with palm-based oil. The relationship between shear stress and shear strain rate of the non-Newtonian palm-based oil is obtained experimentally. Reynolds and energy equations are formulated using the power-law model. The governing equations are calculated numerically to obtain oil film pressure and temperature distributions in the journal bearing. The objective function in this problem is to minimize the flow rate and the temperature rise. Design variables are C/R and L/D ratios. The exhaustive search combined with indirect search programmings are implement to obtain the optimal journal bearing. The numerical results of the optimal journal bearing are compared with the experimental results.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ตามวัตถุประสงค์ ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับเรื่องพฤติกรรมกรรหล่อสั้น และเทคนิคการออกแบบหาขนาดที่เหมาะสมของเบร้งเพลากลม จาก รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณสมคิด พุ่งเจริญ และ คุณสุภีร์ พุ่งเจริญ บิดาและมารดาของข้าพเจ้า ที่เป็นผู้ให้กำลังใจและสนับสนุนข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ให้วิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า
สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย
คุณค่าและประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วรภัทร พุ่งเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 บทความวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 น้ำมันพืช.....	7
2.1 การผลิตน้ำมันพืชในประเทศ.....	8
2.2 องค์ประกอบของน้ำมันพืช.....	8
2.3 ประเภทของกรดไขมัน.....	9
2.3.1 กรดไขมันอิ่มตัว.....	9
2.3.2 กรดไขมันไม่อิ่มตัว.....	9
2.4 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืช.....	10
2.5 สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันพืช.....	11
2.6 คุณสมบัติของน้ำมันพืช.....	13
2.6.1 ค่าไอโอดีน.....	13
2.6.2 จุดหลอมเหลว.....	14
2.6.3 ค่าความหนืด.....	14
2.6.4 ค่าซาปอเนนิฟิเคชัน.....	15
2.6.5 การดูดซับของน้ำมันพืชกับโลหะ.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 3 รีโอโลยี.....	18
3.1 ความหมายของรีโอโลยี.....	18
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด.....	18
3.2.1 ของไหลนิวโทรเนียน.....	18
3.2.2 ของไหลนอนนิวโทรเนียน.....	18
3.3 เครื่องมือวัดทางรีโอโลยี.....	20
3.3.1 เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน.....	20
3.4 คุณสมบัติของรีโอโลยีของน้ำมันปาล์ม.....	21
3.4.1 เส้นกราฟการไหลของน้ำมันปาล์ม.....	21
บทที่ 4 ทฤษฎีของการหล่อลื่นแบบนอนนิวโทรเนียน.....	22
4.1 สมการ โมดิฟายเรย์โนล์ส.....	22
4.2 สมการอัตราการไหลรูปไร้มิติ.....	29
4.3 สมการพลังงาน.....	30
4.4 สมการพฤติกรรมสถิตย์ของแบริงเพลากลม.....	31
บทที่ 5 ทฤษฎีออฟดีไมเซชัน.....	33
5.1 ความจำเป็นของการหาค่าเหมาะสมที่สุด.....	35
5.2 การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในทางวิศวกรรม.....	35
5.3 ประเภทแบบจำลองของปัญหา.....	37
5.4 ขั้นตอนของการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหา.....	38
5.5 ประเภทของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด.....	40
5.6 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด.....	41
5.7 ประโยชน์ของการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการออกแบบ.....	42
5.8 ข้อจำกัดของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด.....	43
5.9 การเลือกวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด.....	44
5.10 การทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	45
5.11 ผลการทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 6 การออกแบบออฟติไมเซชัน.....	53
6.1 สมการวัตถุประสงค์.....	53
6.2 สมการเงื่อนไขบังคับ.....	53
6.3 ผลการออกแบบหาขนาดเบริงที่เหมาะสม.....	54
6.4 ผลการคำนวณเพื่อศึกษาพฤติกรรมสถิตย์ของเบริงขนาดที่เหมาะสม.....	59
บทที่ 7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	63
7.1 กาบรองลื่น.....	63
7.2 เพลากลม.....	64
7.3 อุปกรณ์วัดความดัน.....	64
7.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	65
7.5 อุปกรณ์วัดความหนาของฟิล์มน้ำมัน.....	65
7.6 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์.....	66
7.7 การประกอบกาบรองลื่นเข้ากับเพลาและการติดตั้งอุปกรณ์วัด.....	66
7.8 การปล่อยน้ำมันหล่อลื่นเข้ากาบรองลื่น.....	67
7.9 ลักษณะของกาบรองลื่น.....	67
7.10 ลักษณะของเพลากลม.....	68
7.11 เครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า.....	68
บทที่ 8 วิธีการทดลอง.....	69
8.1 ขั้นตอนการทดลองทางรีโอโลยี.....	69
8.2 ขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการวัด.....	70
8.2.1 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน.....	70
8.2.2 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน.....	71
8.2.3 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความหนาของฟิล์มน้ำมัน.....	71
8.3 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองหาพฤติกรรมการหล่อลื่น.....	72

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 9 เปรียบเทียบผลการทดลองกับทางทฤษฎี.....	74
9.1 พฤติกรรมการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมัน.....	74
9.2 พฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมัน.....	76
บทที่ 10 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	79
10.1 บทสรุป.....	79
10.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
เอกสารอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก. แผนผังลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....	83
ภาคผนวก ข. กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer.....	91
ภาคผนวก ค. กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple.....	93
ภาคผนวก ง. กราฟแสดง Calibration curve ของ Gap sensor.....	96
ภาคผนวก จ. ตารางแสดงคุณสมบัติของน้ำมันพืช.....	97
ภาคผนวก ฉ. ตารางแสดงค่าที่ได้จากการทดลอง.....	99
ภาคผนวก ช. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงผลผลิตของน้ำมันพืช.....8
2.2	แสดงโครงสร้างของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ.....9
2.3	ชนิดของกรดไขมันในน้ำมันพืช.....10
2.4	แสดงปริมาณของสารโทโคฟีโนลในน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ.....12
2.5	แสดงค่าไอโอดีนของน้ำมันพืช.....14
2.6	แสดงจุดหลอมเหลวของน้ำมันพืช.....14
2.7	แสดงค่าความหนืดของน้ำมันพืช.....14
2.8	แสดงค่าซาปอเนฟิเคชันของน้ำมันพืช.....15
จ.1	คุณสมบัติของน้ำมันถั่วเหลือง.....97
จ.2	คุณสมบัติของน้ำมันปาล์ม.....98
จ.3	คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นในปัจจุบัน.....98
ฉ.1	แสดงค่าการกระจายแรงดันและอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง ที่อัตราการ เยื้องศูนย์เท่ากับ 0.2 และที่ความเร็วรอบ 400, 600, 800 rpm.....99
ฉ.2	แสดงค่าการกระจายแรงดันและอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง ที่อัตราการ เยื้องศูนย์เท่ากับ 0.4 และที่ความเร็วรอบ 400, 600, 800 rpm.....99
ฉ.3	แสดงค่าการกระจายแรงดันและอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง ที่อัตราการ เยื้องศูนย์เท่ากับ 0.6 และที่ความเร็วรอบ 400, 600, 800 rpm.....99
ฉ.4	แสดงค่าการกระจายแรงดันและอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันรูปไร้มิติที่ได้จากการทดลอง ที่ อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.2 และที่ความเร็วรอบ 400, 600, 800 rpm.....100
ฉ.5	แสดงค่าการกระจายแรงดันและอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันรูปไร้มิติที่ได้จากการทดลอง ที่ อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.4 และที่ความเร็วรอบ 400, 600, 800 rpm.....100
ฉ.6	แสดงค่าการกระจายแรงดันและอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันรูปไร้มิติที่ได้จากการทดลอง ที่ อัตราการเยื้องศูนย์เท่ากับ 0.6 และที่ความเร็วรอบ 400, 600, 800 rpm.....100

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงผลของการใส่สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันปาล์ม.....13
2.2	การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะ.....16
2.3	การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะ.....16
2.4	การสร้างชั้นของสบู่ของกรดไขมันบนผิวโลหะ.....17
3.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่ของอัตราความเครียดเฉือน.....19
3.2	เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน.....20
3.3	เส้นกราฟแสดงการไหลของน้ำมันปาล์มผสมสาร ZDTP 1% โดยน้ำหนัก.....21
4.1	แสดงลักษณะเชิงเลขาคณิตของเบริงเพลลากลม.....22
4.2	แสดงระบบพิกัดโคออร์ดิเนตของฟิล์มน้ำมันในกบรอนกลิ้งเพลลากลม.....23
4.3	แสดงแรงกระทำบนก้อนปริมาตรสี่เหลี่ยม.....23
5.1	พฤติกรรมการลู่เข้าหาคำตอบคำนวณด้วยวิธี Cauchy.....49
5.2	พฤติกรรมการลู่เข้าหาคำตอบคำนวณด้วยวิธี Davidon-Fletcher-Powell.....49
5.3	พฤติกรรมการลู่เข้าหาคำตอบคำนวณด้วยวิธี Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno.....50
5.4	แสดงภาพรวมของเวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธี Cauchy, Davidon-Fletcher-Powell และ Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ.....50
5.5	แสดงพฤติกรรมการลู่เข้าหาผลลัพธ์ x_1 ด้วยวิธี Cauchy โดยกำหนดค่าเริ่มต้นที่ $x_1=12$, $x_2=14$.....51
5.6	แสดงพฤติกรรมการลู่เข้าหาผลลัพธ์ x_2 ด้วยวิธี Cauchy โดยกำหนดค่าเริ่มต้นที่ $x_1=12$, $x_2=14$.....51
6.1	แสดงค่าผลต่างของอนุกรมรูปเรขาคณิตเทียบกับแกน c/r .....54
6.2	แสดงค่าผลต่างของอนุกรมรูปเรขาคณิตเทียบกับแกน D/L .....54
6.3	แสดงค่าอัตราการไหลรูปเรขาคณิตเทียบกับแกน c/r .....55
6.4	แสดงค่าอัตราการไหลรูปเรขาคณิตเทียบกับแกน D/L .....55
6.5	แสดงค่าต่ำสุดของสมการวัตถุประสงค์เทียบกับแกน c/r คำนวณโดยวิธี Exhaustive Search.....56
6.6	แสดงค่าต่ำสุดของสมการวัตถุประสงค์เทียบกับแกน D/L คำนวณโดยวิธี Exhaustive Search.....56

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.7	แสดงพฤติกรรมการลู่เข้าหาจุดที่สมการวัตถุประสงคมีค่าต่ำสุดของตัวแปรออกแบบ c/r และ D/L จำนวนโดยวิธี DFP.....57
6.8	แสดงพฤติกรรมการลู่เข้าหาจุดที่สมการวัตถุประสงคมีค่าต่ำสุดของตัวแปรออกแบบ c/r และ D/L จำนวนโดยวิธี BFGS.....57
6.9	แสดงกราฟสมการวัตถุประสงครูป 3 มิติ ที่คำนวณได้ เทียบกับแกน c/r และ D/L.....58
6.10	แสดงพฤติกรรมการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันรูปรีมิติเทียบกับแกน θ .....59
6.11	แสดงพฤติกรรมการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันรูปรีมิติเทียบกับแกน ξ .....59
6.12	แสดงพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันรูปรีมิติเทียบกับแกน θ .....60
6.13	แสดงพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันรูปรีมิติเทียบกับแกน ξ .....60
6.14	แสดงพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของภาระที่กระทำกับแบริงรูปรีมิติเทียบกับแกน ε .....61
6.15	แสดงพฤติกรรมการเกิดแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นรูปรีมิติเทียบกับแกน ε.....61
6.16	แสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงมุมแอตติจูดเทียบกับแกน ε .....62
7.1	แสดงตำแหน่งของการติดตั้ง Pressure transducer และ Themocouple บนกาบรองดิน...63
7.2	แสดงลักษณะของเพลากลม..... 64
7.3	แสดงอุปกรณ์ Pressure Transducer..... 64
7.4	แสดงอุปกรณ์ Themocouple.....65
7.5	แสดงอุปกรณ์วัดความหนาของฟิล์มน้ำมัน Gap Sensor.....65
7.6	แสดงอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์.....66
7.7	แสดงการประกอบกาบรองดินเข้ากับเพลากลมและติดตั้งอุปกรณ์วัด.....66
7.8	แสดงการปล่อยน้ำมันหล่อลื่นเข้ากาบรองดิน.....67
7.9	แสดงลักษณะของกาบรองดิน..... 67
7.10	แสดงลักษณะของเพลากลม.....68
7.11	แสดงเครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้าของ Pressure transducer, Themocouple และ Gap sensor.....68
8.1	แสดงผังไดอะแกรมของอุปกรณ์ Rheology lab test.....69
8.2	แสดงอุปกรณ์การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน.....70
8.3	แสดงอุปกรณ์การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....71
8.4	แสดงการสอบเทียบค่าของอุปกรณ์วัดความหนาฟิล์มน้ำมัน.....72
8.5	แสดงผังไดอะแกรมของการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และสงวนอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.1	แสดงการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันจากการคำนวณทางทฤษฎีตามแนวเส้นรอบวงเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 400 rpm. ....74
9.2	แสดงการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันจากการคำนวณทางทฤษฎีตามแนวเส้นรอบวงเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 600 rpm. ....75
9.3	แสดงการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันจากการคำนวณทางทฤษฎีตามแนวเส้นรอบวงเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 800 rpm. ....75
9.4	แสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันจากการคำนวณทางทฤษฎีตามแนวเส้นรอบวงเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 400 rpm. ....76
9.5	แสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันจากการคำนวณทางทฤษฎีตามแนวเส้นรอบวงเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 600 rpm. ....77
9.6	แสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันจากการคำนวณทางทฤษฎีตามแนวเส้นรอบวงเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 800 rpm. ....77
ก.1	แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณขนาดที่เหมาะสมที่สุดของแบร็งเพลากลมโดยใช้วิธี Exhaustive Search ร่วมกับวิธี BFGS..... 83
ก.2	แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณขนาดที่เหมาะสมที่สุดของแบร็งเพลากลมโดยใช้วิธี Exhaustive Search..... 84
ก.3	แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณหาค่าการกระเจิงที่แบร็งเพลากลมสามารถรับ แรงเสียดทานและมุมเอติจูด..... 85
ก.4	แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณหาค่าการกระจายแรงดันและการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในฟิล์มน้ำมัน..... 86
ก.5	แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณหาค่าจุดต่ำสุดด้วยวิธี Cauchy.....87
ก.6	แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณหาค่าจุดต่ำสุดด้วยวิธี DFP.....88
ก.7	แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณหาค่าจุดต่ำสุดด้วยวิธี BFGS.....89
ก.8	แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมย่อย <i>alpha</i> .....90
ข.1	กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer , P1.....91
ข.2	กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer , P2.....91
ข.3	กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer , P3.....92
ข.4	กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer , P4.....92

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.1	กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T1.....93
ค.2	กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T2.....93
ค.3	กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T3.....94
ค.4	กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T4.....94
ค.5	กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T5.....95
ค.6	กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T6.....95
ง.1	แสดง Calibration curve ของ Gap Sensor , G1.....96
ง.2	แสดง Calibration curve ของ Gap Sensor , G2.....96



รายการคำย่อและสัญลักษณ์

c	ความเร็วแสง, ระยะระหว่างเพลากับกาบรองลิน
C_p	ค่าความร้อนจำเพาะ
D	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางเพลลา
e	ค่าเยื้องศูนย์
\bar{F}	แรงเสียดทานรูปไร้มิติ
h	ความหนาฟิล์มน้ำมัน
\bar{h}	ความหนาฟิล์มน้ำมันแบบไร้มิติ, h/c
L	ความยาวกาบรองลิน
m	ค่าคงที่ความหนืดของอุณหภูมิที่ T
m_0	ค่าคงที่ความหนืดของอุณหภูมิที่ T_0
\bar{m}	ค่าคงที่ความหนืดของอุณหภูมิที่ T , $\bar{m} = \frac{m}{m_0}$
N	ความเร็วรอบ
P	แรงดัน
P_0	แรงดันที่บรรยากาศ
\bar{P}	แรงดันรูปไร้มิติ, $\frac{P - P_0}{2N\mu_r (r/c)^2}$
r	รัศมีของเพลลา
T	อุณหภูมิ
T_0	อุณหภูมิที่ทางเข้าน้ำมันหล่อลื่น
\bar{T}	อุณหภูมिरูปไร้มิติ, $\beta(T - T_0)$
\bar{W}	ภาระที่กาบรองลินเพลากลมสามารถรับ
\bar{W}_r	ภาระที่กาบรองลินเพลากลมสามารถรับในแนวรัศมีของเพลลา
\bar{W}_t	ภาระที่กาบรองลินเพลากลมสามารถรับในแนวเส้นสัมผัสกับรัศมีของเพลลา
x	แกนในแนวเส้นรอบวงของแบร์ริง
y	แกนในแนวตั้งฉากกับฟิล์มน้ำมัน
z	แกนในแนวแกนของแบร์ริง

U	ความเร็วเชิงเส้นของแบร์ริง, $2\pi rN$
β	ดัชนีความหนืดเชิงอุณหภูมิต
ε	อัตราการใช้พลังงาน, $\frac{e}{c}$
n	ดัชนีการไหล
η	y/h
θ	มุมตามแนวเส้นรอบวง, $\frac{x}{r}$
μ	ค่าความหนืด
μ_r	ค่าความหนืดอ้างอิง
ξ	$z/(l/2)$
σ	ค่าคงที่ไร้มิติ, $\left(\frac{U}{c}\right)^{n-1}$
ϕ	มุมแอตติจูด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **XIV** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โลกทุกวันนี้เทคโนโลยีได้รุดหน้าอย่างรวดเร็ว ทำให้เครื่องจักรสมัยใหม่ทำงานที่ความเร็วรอบที่สูงมากขึ้น คุณสมบัติของสารหล่อลื่นและอุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นจึงมีผลอย่างมากกับการสึกหรอของแบริ่ง เป็นความคิดที่ดีถ้ามีการค้นหาสารหล่อลื่นชนิดใหม่ขึ้น ที่มีคุณสมบัติการหล่อลื่นดีกว่าปัจจุบัน ที่มีการใช้สารหล่อลื่นซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันพืชซึ่งไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม นำมาเป็นสารหล่อลื่นในการออกแบบแบริ่งเพลากลมด้วยวิธีออดิโอมัดเซชัน เพื่อประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุด

สำหรับอุตสาหกรรมน้ำมันพืชจัดเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญทางเศรษฐกิจ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมต่อเนื่อง รวมทั้งยังเป็นอุตสาหกรรมที่สนับสนุนอุตสาหกรรมอื่น ทำให้เกิดการจ้างงานและสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกร ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมน้ำมันพืชย่อมส่งผลกระทบต่อภาคการเกษตรและภาคอุตสาหกรรม

ประเทศไทยจัดว่าเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งปัจจุบันรัฐบาลได้หันมาส่งเสริมและสนับสนุนภาคอุตสาหกรรมจึงทำให้ภาคเกษตรมีบทบาททางเศรษฐกิจน้อยลง ขณะที่อุตสาหกรรมมีความสำคัญมากขึ้นมีการนำเครื่องจักรและเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาใช้มากขึ้นต้องใช้พลังงานมากขึ้นต้องบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้บางอย่างจำเป็นต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศ

ในช่วงปี พ.ศ. 2517-2525 หมวดน้ำมันเชื้อเพลิงมีมูลค่าการนำเข้าเป็นอันดับแรกเพื่อตอบสนองความต้องการทางด้านพลังงานรวมทั้งน้ำมันหล่อลื่นก็มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมต่าง ๆ ก่อนข้างมาก น้ำมันหล่อลื่นจะทำหน้าที่ช่วยลดแรงเสียดทานและทำให้การสึกหรอของผิวสัมผัสของชิ้นส่วนเครื่องจักรลดลง รวมทั้งช่วยระบายความร้อน ซึ่งมีความสำคัญมากในวงการอุตสาหกรรม คาดว่าในประเทศไทยตลาดน้ำมันหล่อลื่นจะมีการเจริญเติบโตขึ้นในอัตราร้อยละ 7- 8 ต่อปี (จาก ฐานเศรษฐกิจ,2541) จึงส่งผลให้ความต้องการน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base-oil) ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มสูงตามไปด้วย

ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมส่วนมากผลิตมาจาก น้ำมันแร่ (Mineral oil) ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นเหล่านี้เมื่อนำมาใช้และมีการเปลี่ยนถ่ายเมื่อหมดสภาพ น้ำมันหล่อลื่นทั้งหมด

สภาพเหล่านี้มักจะไม่ได้รับการกำจัดที่ถูกต้องจึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการย่อยสลายยากจึงทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

วิทยานิพนธ์นี้ได้ให้นำน้ำมันพืชที่มีการผลิตอย่างแพร่หลายภายในประเทศมาศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ในการหล่อลื่นของแบริ่งเพลลากรวมแบบเทอร์โมไฮโดรไดนามิกส์ โดยใช้ น้ำมันพืชเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oil) และได้ทำการเติมสารเพิ่มคุณภาพ (Additive) ลงไปเพื่อให้มีคุณสมบัติบางอย่างเพิ่มขึ้น และลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)

1.2 บทความวิจัยที่ผ่านมา

ในราวปี ค.ศ. 1886 Reynolds ได้นำเสนอทฤษฎีการหล่อลื่น หรือสมการเรย์โนลด์สำหรับสารหล่อลื่นที่เป็นนิวโตเนียนขึ้นเป็นครั้งแรก ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวนี้ว่าเป็นประโยชน์อย่างมาก ต่อการวิเคราะห์และการคำนวณหาพฤติกรรมของการหล่อลื่นของกาบรองลื่นชนิดต่างๆ ในเวลาต่อมา วิศวกรรมการเกี่ยวกับสารหล่อลื่นได้มีการพัฒนาและวิจัยเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เช่น การพัฒนาให้สารหล่อลื่นมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ตลอดจนการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นให้สามารถทำงานภายใต้สภาวะต่างๆ ได้ เป็นต้น ในการปรับปรุงคุณภาพของสารหล่อลื่นที่ใช้กันส่วนใหญ่ได้แก่ การผสมสารเพิ่มคุณภาพ (additives) ประเภทต่างๆ ลงไป สารเพิ่มคุณภาพที่นิยมใช้ในการเพิ่มค่าความหนืดในน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปมักเป็นสารเพิ่มคุณภาพประเภทโพลีเมอร์ ซึ่งได้แก่ โพลีไอโซบิวทีลีน (Polyisobutylene, PIB) และโอลิฟินโคโพลีเมอร์ (Olefin Copolymer, OCP) เป็นต้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อผสมสารเพิ่มคุณภาพประเภทโพลีเมอร์ลงไปในน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้ น้ำมันหล่อลื่นนั้นมีคุณสมบัติเป็น Non-Newtonian จึงทำให้สมการที่นำเสนออยู่เดิม ไม่สามารถที่ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์เพื่อหาพฤติกรรมของการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นดังกล่าวได้ ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยหลายท่านได้พยายามนำเสนอสมการการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นที่เป็น Non-Newtonian กันอย่างมากมายดังต่อไปนี้

Horowitz H.H และ Steider F.E ได้ทำการศึกษาสารหล่อลื่น ที่ผสมสาร VI Improver และได้นำเสนอสมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์สำหรับกาบรองลื่นเพลลากรวมแบบความยาวจำกัด (Finite Width) โดยในการศึกษาได้พิจารณาให้สมการความหนืดขึ้นอยู่กับฟังก์ชันลอการิทึมของความเค้นเฉือน และได้ใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ในการแก้สมการเรย์โนลด์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการหล่อลื่น เช่น การกระจายความดันของฟิล์มน้ำมันที่หล่อลื่นด้วยทั้งสารหล่อลื่นที่เป็น Newtonian และ Non-Newtonian พร้อมกับหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่นทั้งสองชนิด โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tanner R.I ได้นำเสนอทฤษฎีการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของกาบรองลื่นเพลากลมแบบสั้นสำหรับสารหล่อลื่นที่เป็น Non-Newtonian โดยใช้สมการ Power Law และพิจารณาให้สารหล่อลื่นเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ และอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Condition) เพื่อศึกษาผลของความเสียหายที่มีต่อการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นที่เป็น Newtonian และ Non-Newtonian

Safar Z.S ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมสถิตยของกาบรองลื่นที่มีความยาวมาก (Infinitely Long) ที่หล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นที่เป็น Non-Newtonian โดยใช้สมการ Power Law และได้ทำการศึกษาสมมุติความเร็วให้อยู่ในรูปของสมการโพลีโนเมียล เพื่อให้ได้สมการเรย์โนลด์สำหรับหาค่าการกระจายความดันของฟิล์มน้ำมัน และค่าภาระของกาบรองลื่น จากผลการศึกษาเชิงทฤษฎีพบว่าที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางต่างๆ ค่าดัชนีเลขยกกำลัง (Power Law Index) จะมีผลต่อค่าการกระจายความดัน โดยเมื่อค่าดัชนีเลขยกกำลังมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าการกระจายความดันมีค่าสูงขึ้นด้วย และเมื่อค่าดัชนีเลขยกกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นค่าภาระของกาบรองลื่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

Tanner R.I ได้ทำการศึกษาหาพฤติกรรมสถิตยของสารหล่อลื่นที่เป็น Non-newtonian ในกาบรองลื่นเพลากลมแบบยาวมาก (Infinitely Long) โดยใช้สมการ Cubic shear stress และพิจารณาให้ความดันรวมทั้งสมการการไหลสามารถกระจายอยู่ในรูปของอนุกรมเลขยกกำลัง (Power Series) เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์ความเสียหายของสารหล่อลื่นที่เป็น Newtonian และ Non-Newtonian ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสารหล่อลื่นที่เป็น Non-Newtonian ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำกว่าสารหล่อลื่นที่เป็น Newtonian โดยประมาณ 22.5 เปอร์เซ็นต์

Wada S. และ Hayashi H. ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมกาบรองลื่นของสารหล่อลื่นที่เป็นนอนนิวโตเนียนแบบซูโดพลาสติก (Pseudo-Plastic) ในกาบรองลื่นเพลากลม โดยใช้สมการ Cubic Shear Stress ในการศึกษาได้แบ่งออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกได้ทำการศึกษาเชิงทฤษฎี ซึ่งจากการศึกษาเชิงทฤษฎี พบว่าพฤติกรรมของกาบรองลื่นแบบนอนนิวโตเนียนมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของกาบรองลื่น โดยพบว่าที่อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางเดียวกันค่าการกระจายความดันฟิล์มน้ำมัน รวมทั้งความสามารถในการรับภาระการรองลื่นของกาบรองลื่น มีค่าต่ำกว่าสารหล่อลื่นที่เป็นนิวโตเนียนภายใต้ความหนืดเริ่มต้นเดียวกัน และในส่วนที่สองได้ทำการศึกษาเชิงการทดลอง โดยได้ทำการสร้างเครื่องมือวัดความหนืดชนิดแกนหมุน (Rotational Viscometer) เพื่อหาเส้นโค้งการไหล (Flow Curve) ของสารหล่อลื่นที่ผสมสารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity Index Improver) ซึ่งได้แก่ สารโพลีไอโซบิวทีลีน (PIB) โดยทำการผสมลงไปนํ้ามันสปินเดิล (Spindle) ในอัตราส่วน 0.3% , 1% และ 2% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากการวัดพบว่าสารหล่อลื่นดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นนอนนิวโตเนียนแบบซูโดพลาสติก จากนั้นจึงได้ทำนํ้าสารดังกล่าวไปทดสอบในกาบรองลื่นเพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลมแบบเต็มวง ที่ความเร็วรอบการหมุนของเพลาท่อกับ 308 รอบต่อนาที จากการศึกษาพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองให้ผลใกล้เคียงกับทางทฤษฎี

Mongkolwongroj M. และ Arunmetta A. ได้ทำการศึกษาดังพฤติกรรมการหล่อลื่นในกาวรองลื่นเพลากลมโดยใช้สารหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งในการศึกษาได้ใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Based Oil) และได้ผสมสารโพลีไอโซบิวทีลีน (Polyisobutylene, PIB) สารไดเอสเตอร์ (Diester) รวมทั้งน้ำมันซิลิโคนลงในน้ำมันถั่วเหลือง เพื่อเพิ่มค่าความหนืด และป้องกันการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันพืชกับอากาศรวมทั้งเพื่อป้องกันการเกิดฟองในน้ำมันพืชด้วย จากนั้นจึงทำการทดลองหาเส้นโค้งการไหล (Flow Curve) ของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสมสารเพิ่มคุณภาพดังกล่าว ซึ่งจากกราฟของเส้นโค้งการไหลพบว่าน้ำมันดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็น Non-Newtonian แบบไดลาแตนท์ (Dilatant) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ Cubic Shear Stress ในการศึกษาได้ทำการศึกษาที่ค่า Radial Clearance Ratio เท่ากับ 0.004 จากการศึกษาทางทฤษฎีที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆพบว่าที่ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง เท่ากับ 0.6 ค่าการกระจายความดันมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และที่ 0.8 ค่าการกระจายความดันมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย

Mongkolwongroj M. ,Nujunkaew U. และ Founjaroen V. ทำการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นเพลากลมแบบ Thermohydrodynamic โดยใช้ น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น โดยผสมสารโพลีไอโซบิวทีลีน (Polyisobutylene, PIB) โดยการประมาณโมเดลทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการ Power Law Model โดยทำการศึกษาที่ค่าอัตราส่วนของ เส้นผ่าศูนย์กลางของเพลาลูกกลิ้งและความยาวของกาวรองลื่นที่ค่า 0.5 และใช้ค่าระยะห่างระหว่างเพลาลูกกลิ้งมีค่า 0.08 และ 0.1 ตามลำดับ จากการศึกษาทางทฤษฎีพบว่าที่ค่า Radial Clearance เท่ากับ 0.1 จะให้ค่าการกระจายความดันสูงกว่าที่ค่า Radial Clearance เท่ากับ 0.08

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย

1. เครื่องจักรเคลื่อนที่ทำให้เกิดการเสียดทานและความร้อน น้ำมันหล่อลื่นปัจจุบันเป็นน้ำมันแร่ซึ่ง นับวันจะขาดแคลนมากขึ้น วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาดังพฤติกรรมการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นจากธรรมชาติ ไม่มีมลพิษ

2. การออกแบบแบร้งเพลากลมโดยใช้วิธีออฟติไมซ์เซชัน ทำให้ทราบว่าแบร้งเพลากลมควรมีขนาดเท่าไรจึงจะสามารถก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการใช้งาน

3. นำเสนอข้อมูลคุณสมบัติของสารหล่อลื่นน้ำมันพืช พฤติกรรมการหล่อลื่น และขั้นตอนการออกแบบแบร้งเพลากลมโดยวิธีออฟติไมซ์เซชัน เป็นแนวทางแก่ผู้สนใจพัฒนาในโอกาสต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นสารหล่อลื่น
2. เขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าการกระจายความดันและค่าการกระจายอุณหภูมิภายในชั้นฟิล์มน้ำมันของกาบรองลื่นเพลากลม
3. เขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำการออกแบบขนาดแบร็งเพลากลมที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีออฟติไมซ์เซชัน
4. ศึกษาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อค่าการกระจายความดันและค่าการกระจายอุณหภูมิภายในชั้นฟิล์มน้ำมันของกาบรองลื่นเพลากลมหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืช
5. เปรียบเทียบค่าการกระจายความดันและค่าการกระจายอุณหภูมิภายในชั้นฟิล์มน้ำมันของกาบรองลื่นเพลากลมระหว่างค่าการคำนวณและการทดลอง

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ทำการศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่จะนำมาทดสอบ โดยการเติมสารเพิ่มคุณภาพ ซิงค์ไดอัลไคไลด์ไดไทรโอฟอสเฟต (Zinc Dialkyldithiophosphates) เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันของน้ำมัน
2. ทำการศึกษาค่าความหนืดของน้ำมันพืชที่จะนำมาทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Rotational Viscometer)
3. ทำการออกแบบเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของแบร็งเพลากลมด้วยวิธีออฟติไมซ์เซชัน
4. ทำการทดสอบแบร็งที่มีขนาดเหมาะสมที่สุดเพื่อหาค่าการกระจายแรงดันและการกระจายอุณหภูมิ
5. เปรียบเทียบค่าที่คำนวณ ได้กับค่าที่ได้จากการทดลอง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ในด้านเศรษฐกิจงานวิจัยนี้ต้องการเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางภาคเกษตรที่นอกจากจะนำมาบริโภคทั่วไปแล้วอาจนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้ โดยอุตสาหกรรมน้ำมันพืชเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจภายในประเทศ
2. ในด้านสิ่งแวดล้อมน้ำมันพืชที่ใช้แล้วสามารถที่จะย่อยสลายได้ง่ายกว่าน้ำมันแร่และไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งงบประมาณในการบำบัดน้อยกว่าก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม
3. เป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีคุณค่าประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรมากสามารถที่จะตอบสนองอุตสาหกรรมภายในประเทศได้ และทำให้เกิดการจ้างงานมากขึ้นภายในประเทศ
4. เพื่อลดการนำเข้าน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่เป็นสาเหตุให้ประเทศไทยต้องเสียเปรียบดุลการค้ากับต่างประเทศ
5. การออกแบบขนาดที่เหมาะสมที่สุดของกาบรองดินเพลากลมทำให้กาบรองดินเพลากลมทำงานด้วยประสิทธิภาพสูงสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

น้ำมันพืช

น้ำมันพืชถูกนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นตั้งแต่สมัยอียิปต์โบราณ ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำมาประยุกต์ใช้และเป็นที่ยอมรับกันว่า น้ำมันพืชไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม กรณีที่การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมกำลังเป็นที่สนใจ และเริ่มมีการนำน้ำมันพืชมาเป็นสารหล่อลื่นป้องกันการสึกหรอแต่คุณสมบัติเหล่านี้ยังคงสภาพที่ไม่แน่นอนดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้จึงต้องมีการเติมสารเพิ่มคุณภาพซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารซิงค์ไดอัลไคโคลนไดโครโอฟอสเฟต (Zinc Dialkyldithiophosphates) หรือเรียกย่อสั้นๆว่า ZDTP ซึ่งจะเพิ่มคุณสมบัติต่อต้านการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศให้กับน้ำมันพืช

ถั่วเหลืองเป็นพืชน้ำมันที่สำคัญของโลก เนื่องจากเมล็ดถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายทางทั้งการบริโภคเมล็ดและน้ำมัน การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร การใช้เมล็ดและกากถั่วเหลืองเป็นอาหารสัตว์ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองยังสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อีก เช่น สีทาบ้าน พลาสติก และกาว เป็นผลให้ความต้องการใช้ถั่วเหลืองในการบริโภค และอุตสาหกรรมต่างๆ ขยายตัวมาโดยตลอด โดยผลผลิตถั่วเหลืองเฉลี่ย 5 ปีซ้อนหลัง (ปี 2539/40 - 2543/44) มีประมาณ 157.02 ล้านตัน หรือ คิดเป็น ร้อยละ 55.95 ของปริมาณการผลิตพืชน้ำมันที่สำคัญของโลก นับเป็นปริมาณผลผลิตสูงสุดเมื่อเทียบกับปริมาณผลผลิตพืชน้ำมันที่สำคัญชนิดอื่นๆเช่นฝ้ายเรพซิดและถั่วลิสง

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง ซึ่งเหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้น จัดอยู่บริเวณใกล้เคียงกับเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นปาล์มน้ำมันจึงเจริญเติบโตได้ดีในภาคใต้ของประเทศ บริเวณพื้นที่ที่ปลูกมากที่สุด คือจังหวัดกระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร สตูลและตรัง โดยจังหวัดกระบี่ปลูกมากที่สุดจำนวน 537,637 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 39.40 และรองลงมาได้แก่จังหวัดสุราษฎร์ธานี 405,213 ไร่ และจังหวัดชุมพร 216,798 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 29.70 และ 15.89 ของพื้นที่ปลูกทั้งประเทศตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากผลตอบแทนการปลูกปาล์มน้ำมันดีกว่าการปลูกพืชชนิดอื่นเช่นยางพาราและการทำนาข้าว จึงเป็นแรงจูงใจให้เกษตรกรขยายพื้นที่ปลูกประกอบกับมีโครงการเปลี่ยนพื้นที่ปลูกปาล์มทั่วประเทศ คาดว่าปริมาณความต้องการน้ำมันปาล์มภายในเพิ่มขึ้นมากทั้งนี้เพราะราคาน้ำมันปาล์มในตลาดโลกมีแนวโน้มสูงขึ้น ทำให้ความแตกต่างของราคาภายในและภายนอกประเทศไม่จูงใจให้มีการลักลอบเข้ามาบริโภคโดยในปี 2539 ส่วนแบ่งของน้ำมันปาล์มต่อถาวรบริโภครวมของโลกเท่ากับร้อยละ 15.42 เพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 17.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 การผลิตน้ำมันพืชภายในประเทศ

ในระยะเวลาที่ผ่านมาผลผลิตน้ำมันพืชในประเทศไทยมักไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ ทำให้ผลผลิตที่ได้มีน้อย ต่อมาได้มีการนำเอาเครื่องจักรมาช่วยในการผลิตทำให้สามารถผลิตน้ำมันพืชได้มากขึ้น สำหรับผลผลิตของน้ำมันพืชจากตารางที่ 3 จะพบว่าในปี พ.ศ. 2524 มีทั้งสิ้น 100,000 เมตริกตัน ผลผลิตที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดได้แก่น้ำมันปาล์ม รองลงมาได้แก่น้ำมันละหุ่ง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันรำข้าว

ตารางที่ 2.1 แสดงผลผลิตของน้ำมันพืช

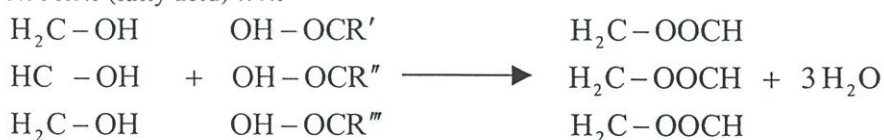
(หน่วย:เมตริกตัน)

ชนิดของน้ำมันพืช	ผลผลิต*		
	2542	2543	2544
น้ำมันมะพร้าว	14,965	19,000	14,000
น้ำมันถั่วลิสง	3,028	14,000	12,000
น้ำมันรำข้าว	10,288	16,500	14,000
น้ำมันถั่วเหลือง	6,104	13,200	11,000
น้ำมันเมล็ดนุ่น	1,979	6,200	5,000
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	5,455	3,000	2,500
น้ำมันปาล์ม	12,000	16,000	20,000
น้ำมันละหุ่ง	2,704	13,000	17,000
อื่นๆ	4,000	5,500	5,000
รวม/เฉลี่ย	60,523	106,400	100,000

*ที่มา : ฝ่ายวิชาการ ธนาคารแห่งประเทศไทย

2.2 องค์ประกอบของน้ำมันพืช

น้ำมันพืชเป็นสารอินทรีย์จำพวกหนึ่ง ซึ่งเป็นส่วนประกอบของกลีเซอรอล (glycerol) กับกรดไขมัน (fatty acid) ดังนี้



กลีเซอรอล

กรดไขมัน

ไตรกลีเซอไรด์

เอกสารนี้เมื่อ R', R'', R''' = โชน์ของกรดไขมัน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ประเภทของกรดไขมัน

กรดไขมันเป็นสารซึ่งประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ต่ออยู่กับโซ่ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Chain) ในโมเลกุลของกรดไขมันอาจมีการจับกันระหว่างธาตุของคาร์บอนทั้ง 1 บอนด์ และ 2 บอนด์ โดยพวกที่มี 1 บอนด์ จะเป็นกรดไขมันอิ่มตัว (Saturated) พวกที่มี 2 บอนด์ จะเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated)

2.3.1 กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated Fatty Acids)

กรดไขมันอิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่ไม่มีพันธะคู่ (Double Bond) อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งคาร์บอนแต่ละตัวบนสายโซ่จะต่อกับไฮโดรเจนอย่างน้อย 2 ตัว หากในน้ำมันพืชมีกรดไขมันอิ่มตัวอยู่มาก จะทำให้น้ำมันพืชนั้นเป็นไขมันตัวอย่างของกรดไขมันอิ่มตัวนี้ได้แก่กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดปาล์มมิติก (Palmitic Acid) เป็นต้น โครงสร้างของกรดไขมันเหล่านี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

2.3.2 กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acids)

กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่โซ่ไฮโดรคาร์บอนจะประกอบด้วยพันธะคู่ตั้งแต่ 1 คู่พันธะขึ้นไป ซึ่งตำแหน่งของพันธะคู่ของกรดไขมันแต่ละชนิดก็จะแตกต่างกันออกไปโดยถ้ามีพันธะเดี่ยวคั่นอยู่ระหว่างพันธะคู่จะเรียกพันธะแบบนี้ว่า พันธะเดี่ยวสลับคู่ (Conjugate Double Bond) ดังแสดงเป็นตัวอย่างดังนี้



ตารางที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของกรดไขมันชนิดต่างๆ

ชื่อของกรดไขมัน	จำนวนคาร์บอน	สูตรโครงสร้าง
กรดลอริก (Lauric)	C 12	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{10}-\text{COOH}$
กรดไมริสติก (Myristic)	C 14	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{12}-\text{COOH}$
กรดปาล์มมิติก (Palmitic)	C16	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COOH}$
กรดสเตียริก (Stearic)	C18	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$
กรดโอเลอิก (Oleic)	C18:1	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$
กรดลิโนลิก (Linoleic)	C18:2	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$
กรดลิโนลินิก (Linolenic)	C18:3	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

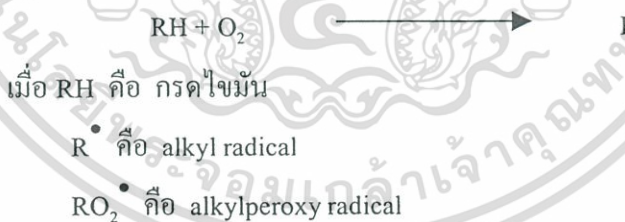
ตารางที่ 2.3 ชนิดของกรดไขมันในน้ำมันพืช

No. of carbon atoms	Name of acid	Coconut oil	Palm kernel oil	Palm oil	Cotton-seed oil	Rape-seed oil	Tallow (beef)	Tallow (mutton)	Lard	Soybean oil
Saturated Acids										
12	Lauric	44-51	47-52	...	...	...	...	...	...	...
14	Myristic	13-19	14-18	0.5-3	1	1	3-6	4-10	1-2	1
16	Palmitic	8-11	7-9	32-45	26-31	1-5	25-37	24-38	22-31	10
18	Stearic	1-3	1-3	4-7	3-5	1-3	14-29	15-30	16-24	2
Total (typical)		92	81	40-50	28-35	3-8	50-55	52-57	35-40	13
Unsaturated Acids										
Monounsaturated										
18	Oleic	5-8	11-19	38-53	19-26	14-38	26-50	38-48	38-44	29
Diunsaturated										
18	Linoleic	1.0-2.5	0.5-2	6-12	37-50	10-22	1-3	...	4-9	51
22	Erucic	...	...	...	...	40-64	...	...	...	...
Triunsaturated										
18	Linolenic	...	...	...	...	8-12	...	...	1-2	7
Total (typical)		8	19	50-60	60-70	92-97	44-52	40-50	60-65	87

2.4 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืช (Oxidation Mechanisms)

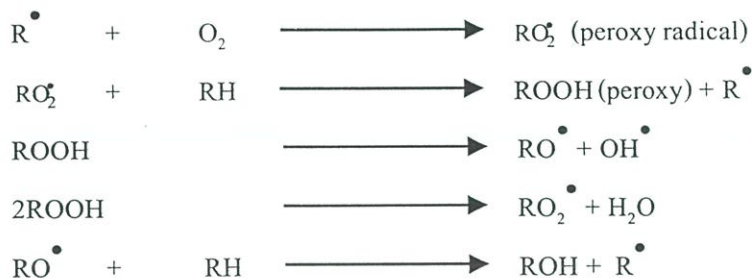
น้ำมันพืชเป็นสารประกอบอินทรีย์ (Organic Compound) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เช่นเดียวกับไฮโดรคาร์บอน ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาอาจเป็นปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ (Chain Reaction) ซึ่งจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) ขั้นเริ่มต้น (Initiation) เป็นขั้นตอนที่มีการเกิดอนุมูลอิสระ หรือที่เรียกว่า Radical Chain Reaction



- 2) ขั้นแพร่กระจาย (Propagation) เป็นขั้นตอนที่อนุมูลอิสระ หรือ Free Radical จับกับโมเลกุลของออกซิเจนเกิดเป็น เปอร์ออกซิไดส์ (Peroxy Radical) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของกรดไขมัน (RH) เพื่อเกิดเป็น เปอร์ออกไซด์ และอนุมูลอิสระตัวใหม่ (R \cdot) ซึ่งสามารถจับโมเลกุลของออกซิเจน (O $_2$) ในอากาศได้อีก ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนกว่า ออกซิเจน หรือ RH จะหมดไป ส่วนสารเปอร์ออกไซด์ที่ได้จะเป็นสารที่ไม่เสถียรซึ่งจะสลายตัวได้ง่าย สารเปอร์ออกไซด์เหล่านี้จะเป็นตัวทำให้เกิดตะกอน (Sludge) หรือ ยางเหนียว (Gum) ในน้ำมันพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- 3) ขั้นสิ้นสุด (Terminal) ของปฏิกิริยา เป็นขั้นที่อนุมูลอิสระ หรือ Free Radical เข้าทำปฏิกิริยากันเอง ได้สารที่ไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา (Nonradical Products) ซึ่งเกิดจากก.อนุ อนุมูลอิสระของ Peroxy Radicals (RO_2^\bullet) เข้าทำปฏิกิริยากันเองดังนี้



ข. เกิดการ cross terminal ของ alkyl radical (R^\bullet) กับ peroxy radicals (RO_2^\bullet) ดังนี้



ค. เกิดการทำปฏิกิริยากันเอง ของ alkyl radical (R^\bullet) ด้วยกันเองดังนี้



2.5 สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันพืช

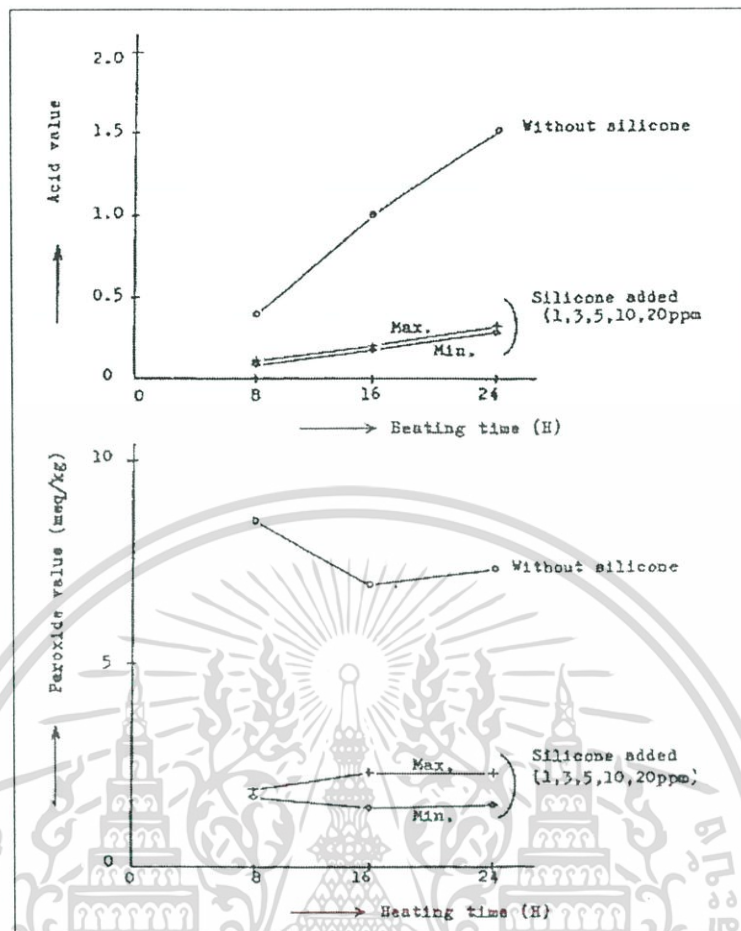
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า น้ำมันพืชเป็นสารประกอบอินทรีย์ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิไดเซชันได้ง่าย โดยเฉพาะถ้าในน้ำมันพืชมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ในโมเลกุลมาก จะเกิดปฏิกิริยาออกซิไดเซชันได้ง่าย ดังนั้นจึงได้มีการพยายามหาสารที่จะมาช่วยยับยั้งหรือ หน่วงให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิไดเซชันเกิดได้ช้าลง หรือไม่เกิดขึ้นเลย

โดยปรกติในน้ำมันพืชจะมีสารต้านทานการเกิดออกซิไดเซชันอยู่ในโมเลกุลของน้ำมันพืชด้วย เช่น สารโทโคฟีรอล (Tocopherol) และอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งในน้ำมันพืชแต่ละชนิดก็จะมีปริมาณของสารมากน้อยไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงปริมาณของสารโทโคฟีรอลในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

	Tocopherols (mg/kg)						
	α -T	β -T	γ -T	δ -T	Total	α -T ₃	γ -T ₃
Anchovy					60		
Capelin					45		
Cocoa butter	11		170	17		2	
Coconut				4		20	
Corn	134	18	412	39			
Cottonseed	573	40	317	10			
Ground nut	169	5	144	13			
Lard	7					2	
Menhaden					30		
Olive	93		7				
Palm	279		61			274	398
Rape	70	16	178	7			
Safflower	477		44	10			
Sesame	12	6	244	32			
Soyabean	116	34	737	275			
Sunflower	608	17	11				

สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่มีอยู่ในน้ำมันพืชนั้นอาจถูกทำลายหรือสูญเสียไปในระหว่างขั้นตอนกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงได้มีการเติมสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันเพิ่มเข้าไปในน้ำมันพืชด้วย สารที่เติมเข้าไปจะไปยังยัง หรือเข้าไปหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain Reaction) ซึ่งอาจเป็นขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation) หรือในขั้นตอนการแพร่กระจาย (Propagation) ก็ได้ ขึ้นอยู่กับประเภทและชนิดของสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันนั้น ดังนั้นในสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป รูปที่ 3.1 แสดงผลของการใช้น้ำมันซิลิโคน (Silicone) เป็นสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันใส่ลงในน้ำมันปาล์ม จากรูปจะเห็นว่าปริมาณของกรด และค่าเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันพืชที่ไม่ได้ใส่น้ำมันซิลิโคนและจากการวิจัยของ Freeman พบว่าการผสมน้ำมันซิลิโคนลงไปในน้ำมันพืชยังสามารถป้องกันการเกิดฟองได้ด้วยซึ่งโดยปกติจะใช้ในปริมาณน้อยโดยประมาณ 1-2 ppm.



รูปที่ 2.1 แสดงผลของการใส่สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันปาล์ม

2.6 คุณสมบัติของน้ำมันพืช

2.6.1 ค่าไอโอดีน (Iodine Number)

ค่าไอโอดีน คือจำนวนกรัมของไอโอดีนซึ่งถูกดูดซับไว้ด้วยไขมัน 100 กรัม ซึ่งค่าไอโอดีนนี้ยังสามารถแสดงถึงความอิ่มตัวมากน้อยของกรดไขมันในน้ำมันพืช และการแห้งตัว (Drying) ได้มากหรือน้อยของน้ำมันพืชแต่ละชนิดอีกด้วย ยกตัวอย่างเช่นถ้าน้ำมันพืชใดมีค่าไอโอดีนสูง (ประมาณ 160-230) ก็แสดงว่าน้ำมันพืชชนิดนั้นเป็นน้ำมันพืชประเภทแห้งเร็ว (Dry Oil) และถ้ามีค่าไอโอดีนปานกลาง (ประมาณ 125-150) ก็แสดงว่าน้ำมันพืชชนิดนั้นเป็นน้ำมันพืชประเภทกึ่งแห้งเร็ว (Semi-Drying Oil) แต่ถ้ามีค่าไอโอดีนต่ำ (น้อยกว่า 120) ก็แสดงว่าน้ำมันพืชชนิดนั้นเป็นน้ำมันพืชประเภทไม่แห้งเร็ว (Non-Drying Oil) ซึ่งค่าไอโอดีนได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าไอโอดีนของน้ำมันพืช

ชนิดของน้ำมันพืช	ค่าไอโอดีน
น้ำมันมะพร้าว	7.5 - 10
น้ำมันถั่วเหลือง	120-141

2.6.2 จุดหลอมเหลว (Melting point)

คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งได้แก่จุดหลอมเหลวซึ่งจากตารางที่ 2.6 จะเห็นว่าน้ำมันปาล์มมีจุดหลอมเหลวสูง จึงทำให้น้ำมันปาล์มปรากฏเป็นไข ที่อุณหภูมิ 35°C ส่วนน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันถั่วเหลือง จะมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 25° และ -16°C ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 2.6 แสดงจุดหลอมเหลว ของน้ำมันพืช

ชนิดของน้ำมันพืช	จุดหลอมเหลว, $^{\circ}\text{C}$
น้ำมันปาล์ม	35°C
น้ำมันถั่วเหลือง	16°C

2.6.3 ค่าความหนืด (Viscosity)

ค่าความหนืดเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการไหลหากน้ำมันพืชมีค่าความหนืดต่ำก็จะไหลได้ง่ายและให้ชั้นฟิล์มน้ำมันที่บาง ส่วนในน้ำมันพืชที่มีค่าความหนืดสูงก็จะให้ชั้นฟิล์มที่หนากว่า ค่าความหนืดของน้ำมันพืชในแต่ละชนิดก็จะมีค่าแตกต่างกันออกไปดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงความหนืดของน้ำมันพืช

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนืด, mPa.s		
	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันปาล์ม
25	51.7	52.3	73.3
40	31.7	33.4	34.6
60	18.5	20	22.6
80	11.1	12.9	8.93
100	9.5	9.09	4.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 ค่าซาปอนนิฟิเคชัน (Saponification Number)

ค่าซาปอนนิฟิเคชันคือจำนวนมิลลิกรัมของโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ใช้ในการทำให้น้ำมันหรือไขมันหนัก 1 กรัม กลายเป็นสบู่ ค่าซาปอนนิฟิเคชันนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกถึงจำนวนพันธะคู่ (Double Bond) ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวว่ามีอยู่มากหรือน้อย เช่น ถ้าค่าซาปอนนิฟิเคชันมีค่าสูงก็แสดงว่าจะมีพันธะคู่ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่น้อย ในทางกลับกันถ้าค่าซาปอนนิฟิเคชันมีค่าต่ำก็แสดงว่าจะมีพันธะคู่ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่มาก ซึ่งค่าซาปอนนิฟิเคชันของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงค่าซาปอนนิฟิเคชันของน้ำมันพืช

ชนิดน้ำมันพืช	ค่าซาปอนนิฟิเคชัน
น้ำมันมะพร้าว	246 – 265
น้ำมันปาล์ม	190 – 195
น้ำมันถั่วเหลือง	190 – 197

2.6.5 การดูดซับของน้ำมันพืชกับโลหะ (Absorption)

จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าในน้ำมันพืชจะประกอบไปด้วยโมเลกุลของกรดไขมัน (Fatty Acid) ซึ่งจะประกอบไปด้วยหมู่ที่มีขั้ว (Polar Group) ซึ่งก็คือส่วนของ $-\text{COOH}$ และหมู่ที่ไม่มีขั้ว (Non-Polar Group) คือส่วนของ $-\text{CH}_2$ ซึ่งการมีขั้วของกรดไขมันในน้ำมันพืชนี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการกลไกการยึดเกาะของกรดไขมันกับผิวของโลหะ กลไกการยึดเกาะของกรดไขมันนี้เราเรียกว่า การดูดซับ (Absorption) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

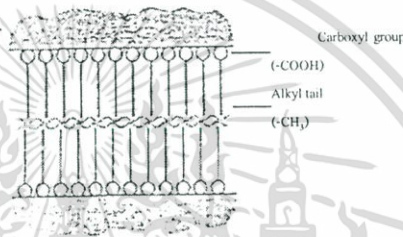
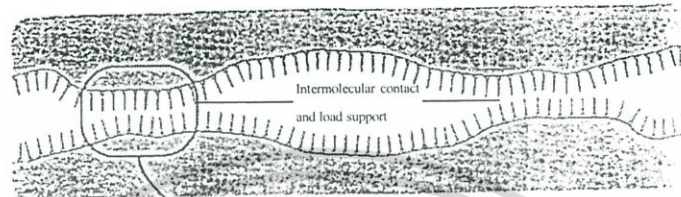
2.6.5.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Absorption หรือ Physisorption)

การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะนี้ เกิดจากการที่หมู่ที่มีขั้ว ($-\text{COOH}$) หันเข้าหาผิวโลหะอันเนื่องจากแรงดึงดูดทางฟิสิกส์ หรือที่เรียกกันว่าแรงวานเดอร์วาลส์ (Vander Walls) ในขณะที่เดียวกันก็จะเอาส่วนที่ไม่มีขั้ว ($-\text{CH}_2$) หันเข้าหาส่วนที่ไม่มีขั้วของโมเลกุลพวกเดียวกันทำให้เกิดการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบของโมเลกุลของกรดไขมันตลอดพื้นผิวโลหะ (ดังแสดงในรูปที่ 3.2) ซึ่งความสามารถในการดูดซับทางกายภาพนี้จะขึ้นอยู่กับขั้ว (Polar) โมเลกุลของกรดไขมันชนิดนั้นๆ ด้วย

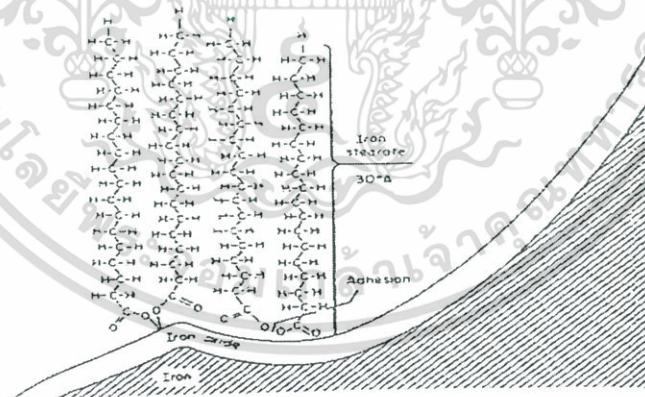
2.6.5.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Absorption หรือ Chemisorption)

การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะนี้ เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของกรดไขมันกับโลหะ ซึ่งจะได้สารประกอบของโลหะ หรือที่เรียกว่าออกไซด์ ยกตัวอย่างเช่น การเกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยากันของกรดสเตียริก (Stearic Acid) กับโลหะที่เป็นเหล็ก จะก่อให้เกิดสารประกอบของโลหะที่เรียกว่าเหล็กสเตียเรท (Iron Stearate) และสปูของโลหะ หรือเหล็กออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นว่าการดูดซับทางเคมีนี้จะทำให้เกิดการสร้างชั้นของสปูโลหะซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นบางๆ (Surface Layer) ล้อมรอบผิวโลหะนั้นไว้



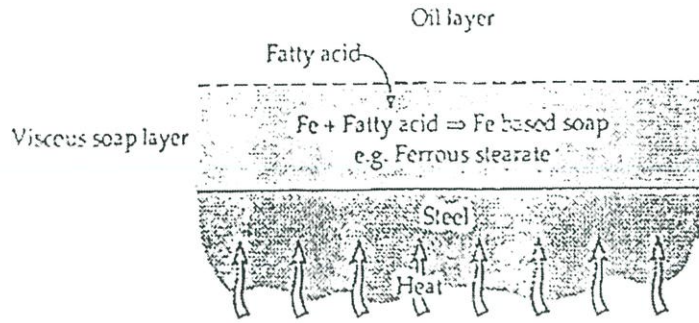
รูปที่ 2.2 การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะ



รูปที่ 2.3 การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะ

การดูดซับทางเคมีนี้อาจจะมีการสร้างชั้นสปูของกรดไขมันบนผิวโลหะขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 2.4 ได้แสดงให้เห็นว่า การดูดซับทางเคมีนี้จะมีการสร้างชั้นสปูของกรดไขมันบนผิวโลหะ ซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นบางๆตลอดรอบพื้นผิวของโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การสร้างชั้นของสบู่ของกรดไขมันบนผิวโลหะ



60485

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

รีโวลอย (Rheology)

3.1 ความหมายของรีโวลอย

รีโวลอยเป็นวิชาที่เกี่ยวกับการไหล โดยมีตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องอันได้แก่ ความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด เป็นต้น

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน อัตราความเครียดเฉือน และความหนืด

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดเฉือน และความเค้นเฉือนแล้ว เราสามารถแบ่งของไหลออกเป็น 2 ประเภท คือ

3.2.1 ของไหลนิวโตเนียน (Newtonian Fluid)

เราจะเรียกของไหลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนเป็นสัดส่วนโดยตรง หรือเป็นเชิงเส้นกับอัตราความเครียดเฉือนว่าของไหลนิวโตเนียน ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.1)$$

สมการที่ (3.1) เรียกว่ากฎของนิวตันสำหรับความหนืด (Newton's Law of Viscosity) โดยที่ τ คือ ความเค้นเฉือน (Shear Stress) และ $\frac{du}{dy}$ คือ อัตราความเครียดเฉือน (Shear Strain Rate) ส่วน μ คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของความหนาแน่น ρ และความหนืดจลน์ ν ได้ดังนี้

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.2)$$

3.2.2 ของไหลนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian Fluid)

ของไหลนอนนิวโตเนียนจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการต่างๆ ได้ดังนี้

$$\tau = m \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (3.3)$$

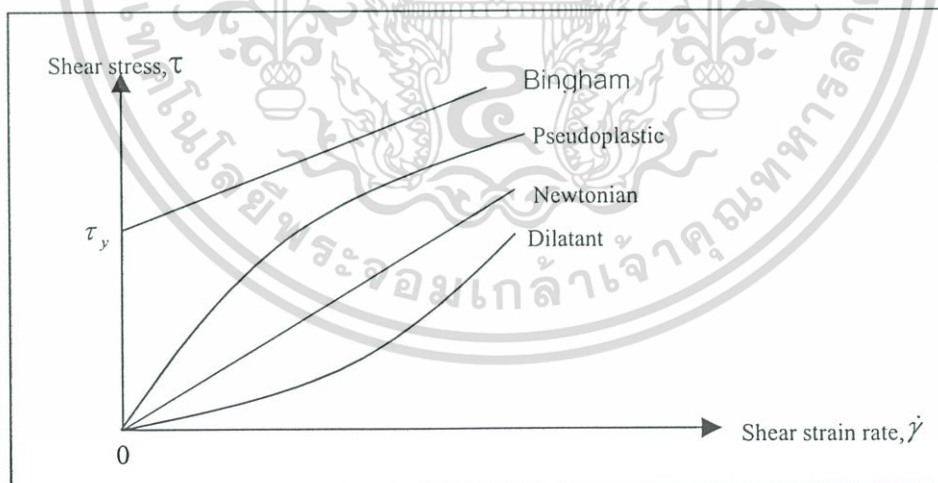
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau + k\tau^3 = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.4)$$

$$\tau = \tau_y + \mu_p \frac{du}{dy} \quad (3.5)$$

ในสมการที่ (3.3) ถ้า $n = 1$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนิวโตเนียน และถ้า $n > 1$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนิวโตเนียนชนิดไดลาแตนท์ (Dilatant) หรือ ถ้า $n < 1$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนิวโตเนียนชนิดซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) ส่วนในสมการที่ (3.4) ถ้า $k = 0$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนิวโตเนียน และ ถ้า $k > 0$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนิวโตเนียนชนิดซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) หรือ ถ้า $k < 0$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนอนิวโตเนียนชนิดไดลาแตนท์ (Dilatant)

สำหรับสมการที่ (3.5) เราเรียกของไหลชนิดนี้ว่าของไหลชนิดพลาสติกบิงแฮม ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับอัตราการความเครียดเฉือนเป็นแบบเชิงเส้นเหมือนกับของไหลนิวโตเนียนแต่จะต่างกับสารหล่อลื่นนิวโตเนียนตรงที่ค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้นของของไหลไม่เริ่มต้นที่ศูนย์ซึ่งเราเรียกค่าความเค้นเฉือนที่จุดเริ่มต้นนี้ว่าความเค้นเฉือนที่จุดคราก (Yield Point) τ_y โดย ถ้า $\tau_y = 0$ จะมีคุณสมบัติเป็นสารหล่อลื่นนิวโตเนียน



รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการความเครียดเฉือน

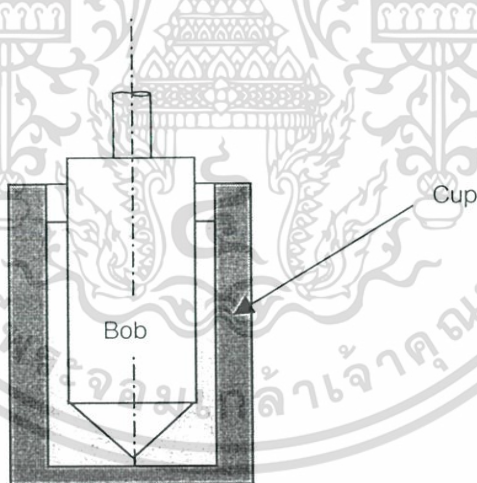
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เครื่องมือวัดทางรีโอโลยี

เครื่องมือวัดทางรีโอโลยีที่ใช้กันในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายชนิด ซึ่งในการเลือกใช้เครื่องมือชนิดใดนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่จะต้องคำนึงถึงได้แก่ชนิดของของไหลที่จะนำมาทดสอบด้วย ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการใช้เครื่องมือวัดทางรีโอโลยีกับจารบี ควรที่จะใช้กับเครื่องวัดความหนืดแบบกรวยบนแผ่นระนาบ (Cone and Plate Viscometer) เป็นต้นเครื่องมือวัดทางรีโอโลยีที่ใช้กันส่วนใหญ่ได้แก่ เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Rotational Viscometer)

3.3.1 เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Rotational Viscometer)

เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Rotational Viscometer) นี้จะประกอบไปด้วยทรงกระบอกสองอันที่มีรัศมีต่างกัน โดยทรงกระบอกอันในจะเป็นท่อทรงกระบอกตันที่หมุนอยู่ภายในท่อทรงกระบอกกลวงซึ่งอยู่กับที่ในการใช้งานจะใส่ของเหลวลงไประหว่างช่องว่างของท่อทรงกระบอกทั้งสอง เมื่อท่อทรงกระบอกอันในหมุนจะทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ภายใต้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของทรงกระบอกอันในและเกิดอัตราความเครียดเฉือนเกิดขึ้นซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นเฉือน และอัตราความเครียดเฉือน สามารถอธิบายได้ด้วยเส้นกราฟแสดงการไหล (Flow Curve) ได้



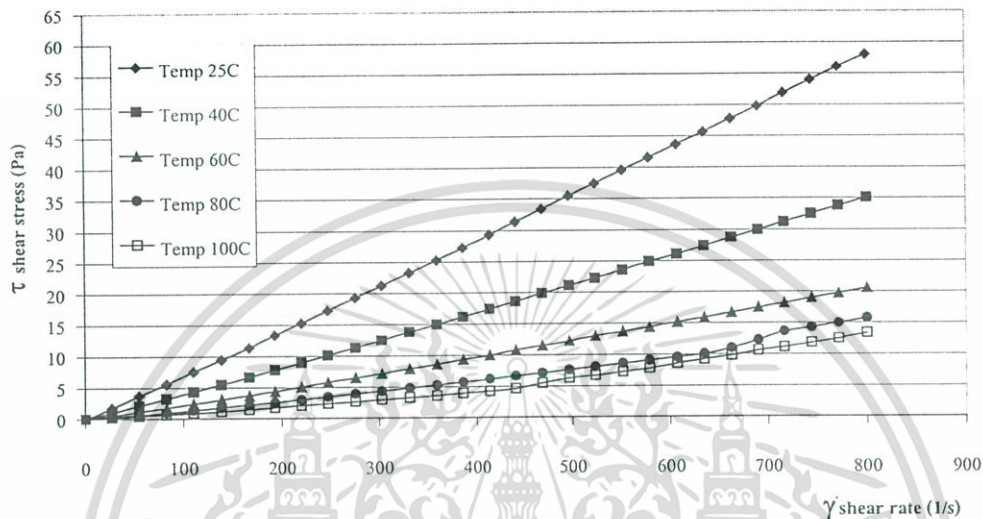
รูปที่ 3.2 เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 คุณสมบัติทางรีโอโลยีของน้ำมันพืช

3.4.1 เส้นกราฟการไหลของน้ำมันพืช

เส้นกราฟการไหลของน้ำมันปาล์มที่ผสมสาร ZDTP 1% โดยน้ำหนักเพื่อป้องกันการสึกหรอและการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิต่างๆ



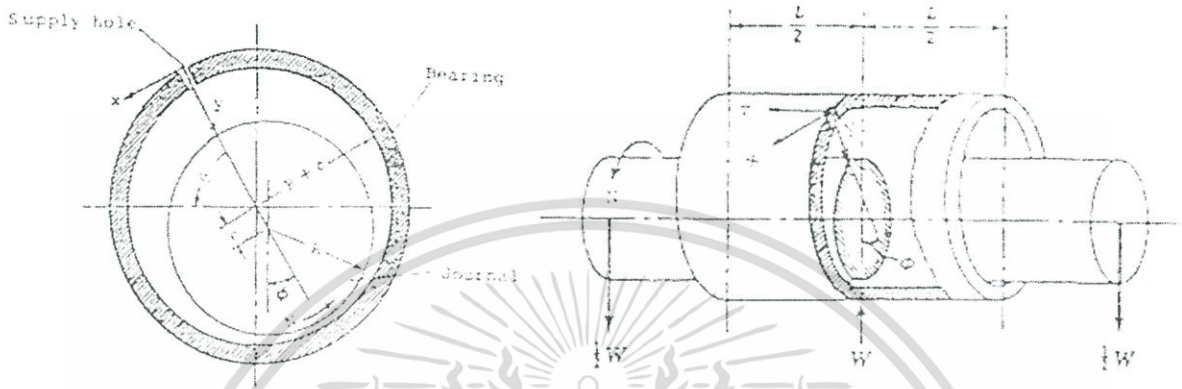
รูปที่ 3.3 เส้นกราฟแสดงการไหลของน้ำมันปาล์มผสมสาร ZDTP 1% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ทฤษฎีของการหล่อลื่นแบบอนนิวโตเนียน

4.1 สมการโมติฟายเรย์โนลด์

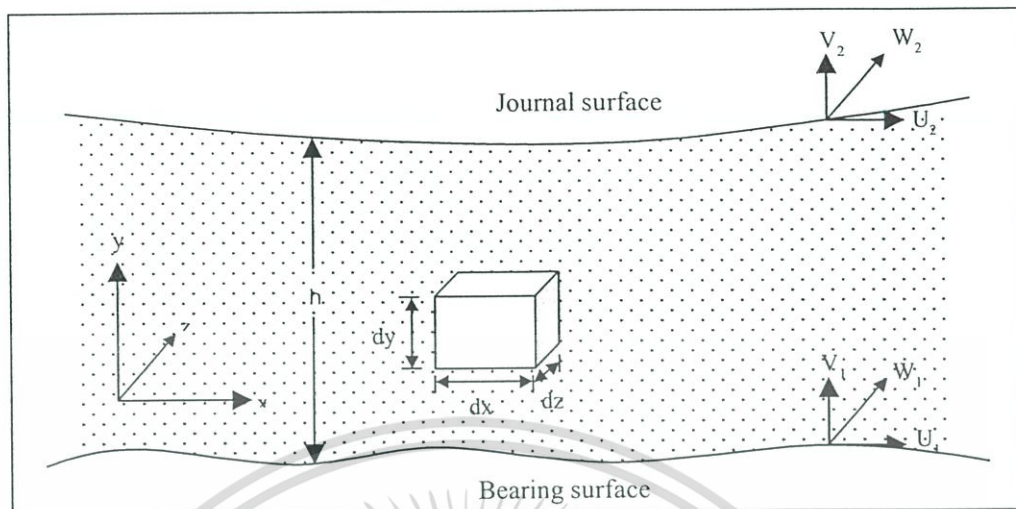


รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะเชิงเลขาคณิตของแบริ่งเพลากลม

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมันของแบริ่งเพลากลม มีข้อสมมุติฐานดังนี้

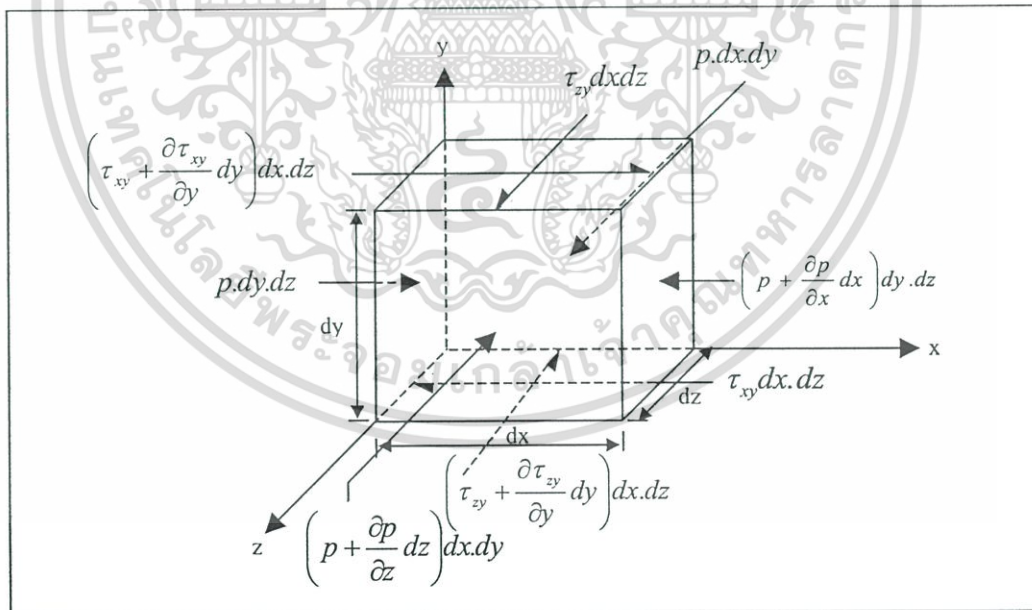
1. ของไหลที่หล่อลื่นมีคุณสมบัติเป็นของไหลอน-นิวโตเนียน (non-Newtonian)
2. ของไหลที่เป็นสารหล่อลื่นอัดตัวไม่ได้
3. เป็นการไหลแบบลาร์มีน่า
4. อุณหภูมิที่ผิวของเพลลาและแบริ่งมีค่าคงที่
5. ไม่คิดผลแรงโน้มถ่วงของโลก
6. ไม่คิดความดันของฟิล์มน้ำมันในแกน y เนื่องจากฟิล์มน้ำมันบางมาก
7. ไม่มีการสิ้นไหลของสารหล่อลื่นที่ผิวสัมผัส
8. ไม่คิดแรงเฉื่อยของของไหล
9. ไม่คิดความเร่งที่เกิดจากการไหลผ่านผิวโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงระบบพิกัดโคออร์ดิเนตของฟิล์มน้ำมันในกาบรองลื่นเพลากลม

พิจารณาก่อนทรงปริมาตรสี่เหลี่ยมของฟิล์มน้ำมันในกาบรองลื่นซึ่งอยู่ภายใต้แรงกระทำ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงแรงกระทำบนก้อนปริมาตรสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 สมการสมดุลของแรงในแนวแกน x :

$$p.dy.dz + \left(\tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy \right) dx.dz = \tau_{xy} dx.dz + \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dy.dz$$

หรือ

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (4.1)$$

ในทำนองเดียวกัน สมการสมดุลของแรงในแนวแกน z :

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} \quad (4.2)$$

จากสมการความเค้นเฉือนของนิวตันเราจะได้ว่า

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4.3)$$

$$\tau_{zy} = \mu \frac{\partial w}{\partial y} \quad (4.4)$$

แทนสมการ (4.3) และ (4.4) ลงใน (4.1) และ (4.2) ตามลำดับ จะได้

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (4.6)$$

อินทิเกรตสมการ (4.5) และ (4.6) จะได้

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{C_1}{\mu} \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{C_2}{\mu} \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u = \frac{y^2}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{C_1 y}{\mu} + C_3 \quad (4.9)$$

$$w = \frac{y^2}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{C_2 y}{\mu} + C_4 \quad (4.10)$$

เงื่อนไขขอบคือ

$$y = 0, u = u_b, w = w_b$$

$$y = h, u = u_a, w = w_a$$

จะได้ว่า

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \left(\frac{2y-h}{2\mu} \right) \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{u_b - u_a}{h} \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \left(\frac{2y-h}{2\mu} \right) \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{w_b - w_a}{h} \quad (4.12)$$

$$u = -y \left(\frac{h-y}{2\mu} \right) \frac{\partial P}{\partial x} + u_b \frac{h-y}{h} + u_a \frac{y}{h} \quad (4.13)$$

$$w = -y \left(\frac{h-y}{2\mu} \right) \frac{\partial P}{\partial z} + w_b \frac{h-y}{h} + w_a \frac{y}{h} \quad (4.14)$$

อัตราการไหลต่อหน่วยความกว้างในทิศทางแกน x และ z

$$q'_x = \int_0^h u dy \quad (4.15)$$

$$q'_z = \int_0^h w dy \quad (4.16)$$

แทนค่าสมการ (4.13) และ (4.14) ลงในสมการ (4.15) และ (4.16) จะได้

$$q'_x = -\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{u_a - u_b}{2} h \quad (4.17)$$

$$q'_z = -\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{w_a - w_b}{2} h \quad (4.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 มวลของสารหล่อลื่นในปริมาตรควบคุม (Control Volume) ที่ขณะใดๆมีค่าเท่ากับ $\rho h \Delta x \Delta z$ อัตราการสะสมของมวลในปริมาตรควบคุมเท่ากับผลต่างระหว่างอัตราการไหลเข้าของมวลในปริมาตรควบคุมและอัตราการไหลออกของมวลในปริมาตรควบคุมดังสมการที่ (4.19)

$$-\frac{\partial \rho \cdot q'_x}{\partial x} - \frac{\partial \rho \cdot q'_z}{\partial z} = \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \quad (4.19)$$

แทนค่าสมการ (4.17) และ (4.18) ลงในสมการ (4.19) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho h(u_a - u_b)}{2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho h(w_a - w_b)}{2} \right] = \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \quad (4.20)$$

ในสภาวะคงตัว (Steady State) และสารหล่อลื่นเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid) ดังนั้นสมการที่ (4.20) เขียนได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h(u_a - u_b)}{2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{h(w_a - w_b)}{2} \right] = 0 \quad (4.21)$$

เงื่อนไขขอบของสมการ (4.21) คือ

$$y = 0, u_b = 0, w_b = 0$$

$$y = h, u_a = U, w_a = 0$$

ดังนั้นสมการเรย์โนลด์ส์จะได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = \frac{U \partial h}{2 \partial x} \quad (4.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของสมการ โมติฟายด์เรย์โนลด์ส์ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราความเครียดเฉือนและอุณหภูมิสามารถเขียนอยู่ในรูปยกกำลัง (Power Law) ได้ดังนี้

$$\mu = m \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \quad (4.23)$$

$$\mu = m_o \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \cdot \exp\{-\beta(T - T_o)\} \quad (4.24)$$

สำหรับสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติเป็นนิวโตเนียน ค่าดัชนีการไหล n จะมีค่าเท่ากับ 1 ถ้าค่า n มีค่าน้อยกว่า 1 สารหล่อลื่นดังกล่าวจะมีคุณสมบัติเป็นนอน-นิวโตรเนียน แบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) และถ้า n มีค่ามากกว่า 1 สารหล่อลื่นดังกล่าวจะมีคุณสมบัติเป็นนอน-นิวโตรเนียน แบบไดลาแทนท์ (Dilatant)

แทนสมการที่ (4.23) และ (4.24) ลงในสมการ (4.5) และ (4.6) แล้วจะได้

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(m \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(m \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (4.26)$$

หรือ

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(m \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^n \right) \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(m \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^n \right) \quad (4.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการเรย์โนลด์ (4.22) สามารถเขียนอยู่ในรูปของ power law เป็นสมการ โมดิฟายเรย์โนลด์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^{n+2}}{12mn} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^{n+2}}{12m} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = \frac{U^n}{2} \frac{dh}{dx} \quad (4.29)$$

แทนค่าสมการ (4.29) ด้วยเทอมไร้มิติดังต่อไปนี้

$$\theta = \frac{x}{r} \quad , \quad \eta = \frac{y}{h} \quad , \quad \xi = \frac{z}{l/2}$$

$$\bar{h} = \frac{h}{c} \quad , \quad \bar{m} = \frac{m}{m_0} = e^{-\beta(\bar{r}-r_0)}$$

$$\bar{P} = \frac{P - P_0}{2\pi N \mu_r} \left(\frac{c}{r} \right)^2 \quad , \quad \sigma = \left(\frac{U}{c} \right)^{n-1} = \left(2\pi N \frac{r}{c} \right)^{n-1}$$

จะได้สมการโมดิฟายเรย์โนลด์รูปไร้มิติเป็น

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\bar{h}^{n+2}}{12mn} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) + \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\bar{h}^{n+2}}{12m} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \xi} \right) = \frac{\sigma}{2} \frac{d\bar{h}}{d\theta} \quad (4.30)$$

เงื่อนไขขอบของสมการโมดิฟายเรย์โนลด์รูปไร้มิติ

$$\bar{P}(0, \xi) = 0$$

$$\bar{P}(\theta, 1) = \bar{P}(\theta, -1) = 0$$

$$\bar{P}(\theta, \xi) = \bar{P}(\theta, -\xi)$$

$$\bar{P}(\theta, \xi) > 0$$

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta}(\theta_n, \xi) = 0$$

4.2 สมการอัตราการไหลรูปไร้มิติ (Dimensionless Flowrate \bar{Q})

พิจารณาจากสมการ (4.19) กรณีสถานะคงตัว (Steady State) ไม่มีการสะสมของมวลใน ปริมาตรควบคุม และของไหลอัดตัวไม่ได้ในรูปไร้มิติ จะได้ว่า

$$-\frac{\partial q'_x}{\partial x} - \frac{\partial q'_z}{\partial z} = 0 \quad (4.31)$$

จากสมการ (4.17), (4.18) เมื่อ $y = 0, u = 0, w = 0, y = h, u = U, w = 0$

$$q'_x = -\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{U}{2} h \quad (4.32)$$

$$q'_z = -\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (4.33)$$

แทนค่าสมการที่ (4.32) และ (4.33) ลงในสมการ (4.31) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = \frac{U \partial h}{2 \partial x} \quad (4.34)$$

จากสมการโมดิไฟเออร์ในลัทธิรูปไร้มิติ (4.30)

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\bar{h}^{n+2}}{12mn} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) + \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\bar{h}^{n+2}}{12m} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \xi} \right) = \frac{\sigma}{2} \frac{dh}{d\theta} \quad (4.35)$$

พิจารณาสมการที่ (4.31) ถึง (4.35) สามารถเขียนสมการอัตราการไหลรูปไร้มิติได้เป็น

$$\bar{Q}_\theta = -\frac{1}{12} \frac{\bar{h}^{n+2}}{nm} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \left(\frac{c}{r} \right)^n + \left(\frac{2\pi N}{60} \right)^{n-1} \left(\frac{c}{r} \right) \left(\frac{h}{2} \right) \quad (4.36)$$

$$\bar{Q}_\xi = -\frac{1}{12} \frac{\bar{h}^{n+2}}{m} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \xi} \left(\frac{c}{r} \right)^n \left(\frac{d}{l} \right)^2 \quad (4.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการไหลเป็นแบบ 2 มิติ ที่ปริมาตรควบคุมใดๆจะได้ว่า

$$\bar{Q} = \bar{Q}_\theta + 2 \bar{Q}_\xi \quad (4.38)$$

4.3 สมการพลังงาน (Energy equation)

จากสมการพลังงานในพิกัด x,y

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \mu \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (4.39)$$

อินทิเกรตสมการพลังงานทั้งสมการตลอดความหนาของฟิล์มน้ำมันจะได้

$$\int_0^h \rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \int_0^h \mu \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (4.40)$$

หลังจากทำการอินทิเกรตสมการ (4.40) แล้วแทนค่าสมการ (4.40) ด้วยตัวเทอมไร้มิติดังต่อไปนี้

$$\bar{T} = \beta(T - T_o)$$

$$A = \frac{1}{2} - \frac{1}{12} \left(\frac{\bar{h}^{n+1}}{nm\sigma} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right)$$

$$B = -\frac{1}{2} \left(\frac{D}{L} \right) \left(\frac{\bar{h}^{n+1}}{m\sigma} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \xi} \right)$$

$$E = \int_0^1 \left\{ 1 - \frac{1}{2} \frac{\bar{h}^{n+1}}{nm\sigma} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} (1-2\eta) \right\}^{n+1} d\eta$$

$$F = \int_0^1 \left\{ 1 - \frac{1}{2} \frac{\bar{h}^{n+1}}{nm\sigma} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} (1-2\eta) \right\}^{n-1} \cdot \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{D}{L} \right) \left(\frac{\bar{h}^{n+1}}{m\sigma} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \xi} \right) (1-2\eta) \right\}^2 d\eta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \frac{(2\pi N)^n m_o \beta \left(\frac{r}{c}\right)^{n+1}}{\rho C_p}$$

แทนค่าเทอมไร้มิติแล้ว สมการพลังงาน (4.39) สามารถเขียนได้เป็นสมการพลังงานรูปไร้มิติได้ดังนี้

$$A \frac{\partial \bar{T}}{\partial \theta} + B \frac{D}{L} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \xi} = \alpha \frac{\bar{m}}{h^{n+1}} (E + F) \quad (4.41)$$

เงื่อนไขขอบของสมการพลังงานรูปไร้มิติ

$$\bar{T}(0, \xi) = 0$$

$$\bar{T}(\theta, 1) = \bar{T}(\theta, -1) = 0$$

$$\bar{T}(\theta, \xi) = \bar{T}(\theta, -\xi)$$

4.4 สมการพฤติกรรมสถิตย์ของแบร์ริงเพลากลม

กำหนดหาค่าการกระจายความดันฟิล์มน้ำมัน แล้วจะสามารถกำหนดหาสมการรูปไร้มิติของส่วนประกอบภาระในแนวรัศมีและตั้งฉากกับรัศมี \bar{W}_ε และ \bar{W}_ϕ ได้จากการอินทิเกรตแรงดันในฟิล์มน้ำมัน ได้ดังนี้

$$\bar{W}_\varepsilon = - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{P} \cos \theta \, d\theta \, d\xi \quad (4.42)$$

$$\bar{W}_\phi = \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{P} \sin \theta \, d\theta \, d\xi \quad (4.43)$$

โดยที่ ภาระ \bar{W} รูปไร้มิติ และมุมแอตติจูด

$$\bar{W} = \sqrt{\bar{W}_\varepsilon^2 + \bar{W}_\phi^2} \quad (4.44)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{W}_\phi}{\bar{W}_\varepsilon} \right) \quad (4.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณค่าการกระจายความดันฟิล์มน้ำมันแล้ว แล้วจะสามารถคำนวณหาแรงเสียดทานรูปไร้มิติ รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้ ดังสมการที่ (4.46) และ (4.47) ตามลำดับ

$$\bar{F} = \sigma \int_0^1 \int_0^{2\pi} \frac{\bar{m}}{\bar{h}^n} \left(1 + \frac{\bar{h}^{n+1}}{2mn\sigma} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right)^n d\theta d\xi \quad (4.46)$$

$$f_{\text{coefficient}} = \frac{\bar{F}}{\bar{W}} \quad (4.47)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีออปติไมเซชัน (Optimization Theory)

ทฤษฎีและเทคนิคการออกแบบของงานทางด้านวิศวกรรมมีอยู่หลายแบบและหลายวิธีด้วยกัน แต่ละแบบแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ตามทฤษฎีของวิชา Engineering Optimization นั้นก็มีเทคนิคการออกแบบอยู่มากมายหลายวิธี อย่างไรก็ตามความรู้พื้นฐานทางด้านวิศวกรรมเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นมากในการสร้างสมการ objective function และกำหนดเงื่อนไขบังคับให้สอดคล้องกับงานจริงที่เราต้องการทำการออกแบบ และเพื่อให้สามารถหาคำตอบได้อย่างถูกต้อง ผู้ออกแบบต้องมีความรู้พื้นฐานในด้านนั้นๆเป็นอย่างดีจึงจะสามารถสร้างสมการ objective function ขึ้น และสามารถเลือกกำหนดสมการ constrain ได้อย่างถูกต้อง

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด(Optimization) จัดอยู่ในวิชาการวิจัยดำเนินงาน (Operation research) ซึ่งเป็นแขนงวิชาที่พัฒนามาแล้วเป็นเวลากว่า 30 ปี เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับกันสำหรับความสำเร็จและผลประโยชน์ที่ได้การนำเทคนิคต่าง ๆ มาใช้ นักวิชาการในสาขาวิชาชีพต่าง ๆ ได้พยายามอย่างยิ่งในการวิจัยปัญหาในสายงานที่เกี่ยวข้องเพื่อจะได้นำวิธีการต่าง ๆ มาพัฒนาปรับปรุงงานให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ประกอบกับความก้าวหน้าทางคอมพิวเตอร์มีมากขึ้น ทำให้สามารถแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่และผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น แนวโน้มความสนใจและการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ จึงมีมากยิ่งขึ้นด้วยเช่นกัน

การวิจัยดำเนินงานมีจุดเริ่มต้นในปี คริสต์ศักราช 1937 ซึ่งอยู่ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง โดยฝ่ายทหารของอังกฤษได้ให้นักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อว่า Sir Robert Watson-Wait ทำการวิเคราะห์ปัญหาการใช้อุปกรณ์เรดาร์ในการจับเครื่องบินและเวลาที่เครื่องบินเข้าศึกเข้าโจมตีจริง ๆ ถ้าเรดาร์จับได้เร็วก็จะทำให้มีเวลาเตรียมการส่งเครื่องบินประจัญบานขึ้นไปต่อสู้ได้ทัน นักวิทยาศาสตร์ได้วิเคราะห์ลักษณะการปฏิบัติการของสถานีเรดาร์แต่ละแห่ง ตลอดจนวงจรการสื่อสารและวิธีการปฏิบัติงานจนได้ผลเป็นตัวเลขเสนอต่อรัฐบาลเพื่อปรับปรุงสถานีเรดาร์ทั้งหมดของกองทัพอากาศอังกฤษ ผลงานครั้งนี้แสดงว่านักวิทยาศาสตร์สามารถช่วยนักบริหารในการวิเคราะห์แก้ไขปัญหาต่าง ๆ ได้ ต่อมาในปีคริสตศักราช 1941 กองทัพอากาศอังกฤษได้จัดตั้งหน่วยวิจัยทางทหารและนำไปใช้แพร่หลายในหน่วยงานของกองทัพบกและกองทัพเรือ ในปีคริสตศักราช 1942 รัฐบาลสหรัฐอเมริกาได้ตั้งหน่วยงานวิจัยดำเนินงานขึ้นเป็นครั้งแรกโดยได้รับคำแนะนำจากรัฐบาลอังกฤษ และเป็นการร่วมมือกับการปฏิบัติการทางทหารของอังกฤษ ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้ตั้งหน่วยวิจัยดำเนินงานโดยใช้ชื่อต่างกัน ในกองทัพอากาศเรียกว่า Operation Analysis แต่ในกองทัพบกและกองทัพเรือเรียกว่า Operations Research and Operation Evaluation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงทศวรรษของปี คริสต์ศักราช 1940 นักวิทยาศาสตร์หลาย ๆ ท่านได้พัฒนาวิธีการที่เรียกว่า โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) เพื่อนำไปใช้ในเรื่องการจัดสรรทรัพยากรในวงการอุตสาหกรรมต่าง ๆ และนักคณิตศาสตร์ชาวอเมริกา ชื่อ George B. Dantzig ได้คิดค้นวิธีการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นที่มีประสิทธิภาพสูงที่เรียกว่า วิธีซิมเพล็กซ์ (Simplex Method) ในปี คริสต์ศักราช 1947 นอกจากนี้ในปี คริสต์ศักราช 1950 Von Neuman ได้พัฒนา วิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) สำหรับแก้ปัญหาในโครงการป้องกันเรือดำน้ำนิวเคลียร์ ในปี คริสต์ศักราช 1958 กองทัพเรือสหรัฐอเมริกาได้ทำการวิจัยเพื่อหาวิธีวางแผนและควบคุมงานในโครงการผลิตและติดตั้งจรวดที่เรียกว่า โพลาริส (Polaris) โดยได้คิดค้นวิธี PERT (Program Evaluation Review Technique) ซึ่งเทคนิคเหล่านี้รู้จักเพียงในกลุ่มนักวิจัยดำเนินงานที่ได้รับการนำไปพัฒนาใช้กับวงการอุตสาหกรรม ทำให้การวิจัยดำเนินงานได้รับการยอมรับและได้รับการพัฒนาทั้งวิธีการและรูปแบบให้ทวีขอบเขต ขนาด และซับซ้อน ตามการขยายตัวของเศรษฐกิจและสังคม

ภายหลังสงครามโลกครั้งที่สองสิ้นสุดลง ประเทศอังกฤษได้นำเอาวิธีการวิจัยดำเนินงานมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมและรัฐวิสาหกิจเป็นประเทศแรก โดยได้เริ่มใช้กับอุตสาหกรรมทำถ่านหินเป็นอุตสาหกรรมประเภทแรก ต่อมาจึงได้ขยายตัวเข้าไปสู่อุตสาหกรรมประเภทอื่น ๆ และใช้ในการบริหารงานด้านการขนส่ง ส่วนสหรัฐอเมริกานั้นไม่ค่อยให้ความสนใจในการนำไปประยุกต์กับงานด้านธุรกิจมากนักในระยะแรกจนกระทั่งได้มีการขยายตัวในการใช้เครื่องจักรแทนคน สหรัฐอเมริกาจึงได้ทำการฟื้นฟูและส่งเสริมวิทยาการแขนงนี้จนนิยมใช้อย่างแพร่หลาย ได้มีการจัดตั้งสมาคมและจัดสอนขึ้นในมหาวิทยาลัยและสถาบันการศึกษาชั้นสูง ประกอบกับในช่วงทศวรรษของปี คริสต์ศักราช 1950 ได้มีการคิดค้นเครื่องคอมพิวเตอร์และได้มีการนำเอาเครื่องคอมพิวเตอร์มาใช้เป็นเครื่องมือในการวิจัยดำเนินงาน ทำให้การวิจัยดำเนินงานได้รับการพัฒนาหลักการและวิธีการไปสู่อย่างงานต่าง ๆ ที่มีความสลับซับซ้อนได้มากขึ้นตามลำดับ

นักวิทยาศาสตร์ได้มีความพยายามพัฒนาและนำเอาวิธีการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการจัดการทรัพยากรต่าง ๆ ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุด และมีผู้นำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ เช่น การกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม การหาเส้นทางการบินพาณิชย์ ส่วนผสมของอาหารสัตว์ การกำหนดทิศทางของขีปนาวุธ การหากระบวนการที่เหมาะสมที่สุดของการทำปฏิกิริยาทางเคมี เป็นต้น

5.1 ความจำเป็นของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด(The Need for Optimization)

เป้าหมายของการแก้ปัญหาในทางอุตสาหกรรม คือการตัดสินใจเลือกทางเลือกที่ดีที่สุด ยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตจะต้องทำการปรับปรุงส่วนใดบ้าง การจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้ได้ประโยชน์มากที่สุด การเลือกวิธีการออกแบบที่มีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้น น้อยที่สุดและให้ผลกำไรสูงสุด เป็นต้น การวางแผนและการกำหนดการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพ จะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นได้ เช่นเดียวกันกับการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนใหม่ เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่มีราคาต่ำ การออกแบบทางวิศวกรรมจะต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ ในการออกแบบ ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายด้าน เช่น ขอบเขตจำกัดทางรูปร่าง น้ำหนัก ราคาของวัตถุดิบ งบประมาณที่มีอยู่อย่างจำกัด และวิธีการผลิตที่จะทำได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เป็นต้น

ปัญหาดังกล่าวทำให้ข้อกำหนดในการออกแบบมีความยุ่งยากมากยิ่งขึ้น เมื่อทางเลือกที่เป็นไปได้มีหลายทางเลือก ผู้ออกแบบจะทำการเลือกทางเลือกที่ตรงกับความที่ต้องการที่กำหนดไว้ โดยการนำวิธีการของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด(Optimization) เพื่อเลือกทางเลือกที่ดีที่สุด ซึ่งค่าคำตอบ ที่ได้จะอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของปัญหาที่กำหนดขึ้นตามลักษณะของปัญหาหรือตามความต้องการของผู้ออกแบบ

5.2 การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในทางวิศวกรรม

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาทาง วิศวกรรมศาสตร์อย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น

1. การออกแบบเครื่องบินเพื่อให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด
2. การกำหนดนโยบายการผลิตที่ดีที่สุด การกำหนดระดับจำนวนผลิต เพื่อให้ได้กำไร มากที่สุดภายใต้ทรัพยากรที่มีอยู่จำกัด
3. หาทิศทางการเดินทางที่เหมาะสมที่สุดของยานอวกาศ
4. การจัดสรรทรัพยากรน้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุด
5. การออกแบบชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องจักรกล ให้มีขนาดที่เหมาะสมและมี ราคาประหยัด
6. ใช้ในการหาสถานที่ตั้งโรงงานที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัตถุดิบและค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้าไปสู่ผู้บริโภคมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ใช้หาระบบหรือกระบวนการทางเคมีที่เหมาะสม
8. วางแผนการซ่อมบำรุงและการเปลี่ยนชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลที่เหมาะสมในการดำเนินงาน
9. ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม
10. ใช้ในการเลือกเงื่อนไขในการตัด โลหะแผ่นให้ได้ปริมาณชิ้นส่วนที่ต้องมากที่สุด และมีค่าใช้จ่ายในการผลิตน้อยที่สุด
11. การออกแบบเครื่องใช้ไฟฟ้าเช่น มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้า ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
12. การออกแบบในทางวิศวกรรมโยธา เช่น การออกแบบอาคาร สะพาน และเขื่อน เป็นต้น เพื่อให้มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่ำที่สุด
13. ใช้ในการจัดระบบการสื่อสารและคมนาคม เพื่อให้ได้ผลตอบแทนมากที่สุด
14. ใช้ในการออกแบบวางท่อประปา เพื่อให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด
15. การหาสัดส่วนการผสมอาหารสัตว์ว่าจะใช้วัตถุดิบอย่างไรบ้าง จำนวนเท่าไร จึงจะทำให้ต้นทุนการผสมอาหารสัตว์ต่ำที่สุด โดยที่คุณค่าของอาหารสัตว์นั้นยังคงเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด เป็นต้น

การออกแบบทางวิศวกรรมมีเป้าหมายของการออกแบบ คือ การเลือกค่าตัวแปรที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ภายใต้เงื่อนไขหรือสภาวะแวดล้อมที่กำหนดจากประสบการณ์ของผู้ออกแบบหรือจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ผู้ออกแบบต้องการ และเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมและข้อกำหนดในการออกแบบ เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นวิธีที่น่าเชื่อถือทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการศึกษาปัญหาเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด นักออกแบบต้องคำนึงเสมอว่าการออกแบบไม่ใช่ทำเพื่อตอบสนองความอยากรู้อยากเห็นในทางวิทยาศาสตร์เท่านั้น เพราะสิ่งที่จะออกแบบควรเป็นสิ่งที่สังคมต้องการและเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ เมื่อทราบความต้องการของสังคมแล้วอันดับต่อไปคือการสร้างกรอบความคิดหลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้โดยขั้นตอนนี้อาจมีการทำซ้ำเพื่อให้แนวคิดที่วางไว้มีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

สมัยก่อนในการออกแบบผลิตภัณฑ์จะใช้วิธีการดั้งเดิมที่กำหนดไว้ก่อนหน้านั้น เมื่อทำตามขั้นตอนดังกล่าวก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยไม่มีการปรับปรุงแก้ไขวิธีการแต่อย่างใด ในบางครั้งมีประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบและวิธีการออกแบบที่ใช้ไม่มีการพัฒนา ในความเป็นจริงในการออกแบบควรมีการปรับปรุงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

การออกแบบที่เหมาะสมที่สุด คือการเลือกขนาดหรือวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นตามข้อกำหนดที่กำหนดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น มีราคาอยู่ในช่วงที่กำหนด สามารถทำงานได้ตามต้องการ เป็นต้น โดยทั่วไปการออกแบบที่เหมาะสมจะอยู่ภายใต้พื้นฐานความรู้ทางวิศวกรรมที่อยู่ในรูปของสมการความสัมพันธ์หรือกราฟแสดงความสัมพันธ์ และประสบการณ์ของผู้ออกแบบ

5.3 ประเภทของแบบจำลองของปัญหา

แบบจำลอง(Model) ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพราะจะเป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าเราเข้าใจลึกซึ้งในปัญหามากน้อยแค่ไหน แบบจำลอง โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. แบบจำลองทางกายภาพ(Physical Model) คือแบบจำลองที่จำลองของจริงออกมาให้มีรูปร่างอย่างเดียวกัน และมองเห็นเหมือนจริง เช่น แบบจำลองการจับยึดของโมเลกุลทางเคมี ทำให้ทราบถึงลักษณะของการจับยึดของอนุภาค เป็นต้น

2.แบบจำลองแผนภาพ(Schematic Model) คือ การแสดงข้อเท็จจริงหรือข้อความต่าง ๆ ออกมาเป็นแผนภาพ ซึ่งง่ายและสะดวกต่อการทำความเข้าใจ หรือเป็นการรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ มาจำลองในรูปของแผนภาพ หรือแผนภูมิต่าง ๆ แบบจำลองแผนภาพนี้อาจจะเหมือนหรือไม่เหมือนกับสภาพการณ์ของเหตุการณ์จริงก็ได้ เช่น แผนภาพแสดงปริมาณการขายสินค้าในแต่ละไตรมาส แผนภูมิควบคุมชนิดค่าเฉลี่ย-พิสัย เป็นต้น

3. แบบจำลองคณิตศาสตร์(Mathematical Model) คือการจำลองสภาพเหตุการณ์ต่าง ๆ ออกมาในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของตัวในการตัดสินใจต่าง ๆ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการทำนายเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต หรือใช้ในการควบคุมการดำเนินงานขององค์กรต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ถึงแม้ว่าจะพยายามสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ให้ใกล้เคียงกับเหตุการณ์หรือปัญหาจริงที่สุดแล้วก็ตาม แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้นั้นยังไม่สามารถสร้างเหมือนเหตุการณ์จริงหรือปัญหาจริงได้อย่างสมบูรณ์ เพราะในการสร้างแบบจำลองนี้จะต้องสร้างภายใต้ข้อสมมุติฐานต่าง ๆ ดังนั้นในการทำนายเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตจะต้องคำนึงถึงข้อสมมุติฐานนี้ด้วย เพราะในบางครั้งสมมุติฐานที่กำหนดขึ้นอาจจะไม่ถูกต้อง ทำให้คำตอบที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริงหรือในบางครั้งการตั้งสมมุติฐานไม่ถูกต้องอาจทำให้ไม่สามารถหาคำตอบได้

5.4 ขั้นตอนของการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหา

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมไม่ว่าจะเป็นปัญหาใด ๆ ก็ตามจะต้องมีวิธีการและขั้นตอนในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดดังต่อไปนี้

5.4.1 การกำหนดปัญหา

ปัญหาที่จะทำการแก้ไขจะต้องกำหนดขอบเขตและเป้าหมายของการแก้ปัญหาอย่างชัดเจน เพราะในบางครั้งขอบเขตของปัญหากว้างเกินไปหรือไม่ชัดเจน จะทำให้การแก้ปัญหาเป็นไปได้อย่างยาก ในบางครั้งไม่สามารถหาผลลัพธ์ได้หรือถ้าแก้ปัญหาก็ได้ผลลัพธ์ที่ได้จะไม่ถูกต้อง ปัญหาอาจมีเป้าหมายหลายอย่างในขณะเดียวกัน และเป้าหมายแต่ละอย่างมีความสำคัญไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถแบ่งเป้าหมายออกเป็น 2 ประเภท คือ

- **เป้าหมายเดียว** เป้าหมายของปัญหามีเพียง 1 เป้าหมายเท่านั้น ซึ่งเป็นเป้าหมายแบบสูงสุดหรือต่ำสุดก็ได้ เช่น ต้องการออกแบบเครื่องบินเพื่อให้น้ำหนักน้อยที่สุด การออกแบบวางแผนการวางท่อประปาเพื่อให้เสียค่าใช้จ่ายในการวางท่อน้อยที่สุด เป็นต้น

- **เป้าหมายหลายเป้าหมาย** คือ เป้าหมายของปัญหามีมากกว่า 1 เป้าหมาย ซึ่งแต่ละเป้าหมายอาจจะเป็นแบบเดียวกัน หรือตรงกันข้ามกันก็ได้ เช่น ต้องการทำให้ส่วนแบ่งของสินค้าในตลาดมีค่าสูงสุด และขณะเดียวกันก็ต้องการทำให้ได้กำไรรวมสูงสุดด้วย ปัญหาลักษณะนี้เรียกว่าเป้าหมายแบบเดียวกัน แต่ในบางกรณีเป้าหมายอาจจะเป็นคนละแบบก็ได้ เช่น ต้องการผลิตสินค้าเพื่อให้ได้กำไรสูงสุด และในขณะเดียวกันต้องทำให้เสียค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดด้วย

ขั้นตอนในการกำหนดปัญหาของการออกแบบพอลีก้าวโดยสังเขปได้ดังนี้

- กำหนดเป้าหมายของการออกแบบ
- ศึกษาตัวแปรในการออกแบบที่มีผลต่อเป้าหมายของการออกแบบ
- กำหนดข้อจำกัดหรือเงื่อนไขของการออกแบบ
- กำหนดแนวทางในการออกแบบ
- กำหนดช่วงเวลาในการวิเคราะห์ปัญหาและระยะในการดำเนินงาน

5.4.2 การจัดรูปปัญหาให้อยู่รูปแบบทางคณิตศาสตร์

เมื่อได้จัดตั้งปัญหาและทำความเข้าใจกับปัญหาอย่างถูกต้องแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการจัดรูปแบบของปัญหาให้ช่วยต่อการวิเคราะห์ โดยจัดรูปของปัญหาให้เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะมีโครงสร้างดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สมการกำหนดเป้าหมายหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) คือสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของเป้าหมายกับตัวแปรสำหรับตัดสินใจ สมการเป้าหมายนี้จะ เป็นแบบสูงสุดหรือต่ำสุด(maximize, minimize) ก็ได้ และค่าของสมการเป้าหมายจะเปลี่ยนแปลงตามค่าของตัวแปรสำหรับตัดสินใจ เช่น การผลิตเพื่อให้ต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด การผลิตสินค้าเพื่อให้ได้กำไรสูงสุด การออกแบบชิ้นส่วนต่างเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีที่สุด ฯลฯ โดยสมการแสดงความสัมพันธ์อาจจะมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา

- สมการแสดงขอบข่ายหรือเงื่อนไขบังคับ(constraint) ซึ่งแสดงขอบเขตหรือข้อจำกัดของปัจจัยหรือทรัพยากรในรูปของสมการ(equality) หรืออสมการ (inequality)

- ตัวแปรในการออกแบบหรือตัวแปรตัดสินใจ เป็นตัวแปรที่เราต้องการทราบค่าตัวแปรดังกล่าวจะมีตัวเดียวหรือหลายตัวก็ได้ และเป็นตัวแปรที่มีผลต่อสมการเป้าหมายที่กำหนดขึ้น ตัวแปรในการออกแบบสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด คือ ตัวแปรที่มีความต่อเนื่อง ตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่อง และตัวแปรที่เป็นจำนวนเต็ม

5.4.3 การทดสอบรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาและการหาผลลัพธ์ของปัญหา

บ่อยครั้งที่รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาไม่ถูกต้อง เนื่องจากความบกพร่องบางประการ ทำให้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไม่ใช่ตัวแทนของปัญหาอย่างแท้จริงจึงทำให้การหาผลลัพธ์เป็นไปได้ ดังนั้นควรมีการตรวจสอบการจัดตั้งปัญหาเปรียบเทียบกับปัญหาจริง ตรวจสอบการใช้หน่วยและมิติของตัวแปรต่าง ๆ ว่าสอดคล้องกันหรือไม่ โดยสามารถทำการตรวจสอบด้วยการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในสมการทางคณิตศาสตร์แล้วดูว่าจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ นั้นสอดคล้องกับค่าที่ควรจะเป็นหรือไม่ และตรวจสอบโดยใช้ข้อมูลในอดีตมาทดสอบรูปแบบทางคณิตศาสตร์แล้วนำเอาผลลัพธ์ไปเปรียบเทียบกับความเป็นจริงที่เกิดขึ้น ในการหาผลลัพธ์หรือคำตอบของปัญหาจะเลือกใช้วิธีการต่าง ๆ ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของแต่ละวิธีว่าเหมาะสมกับปัญหาหรือสามารถแก้ปัญหาได้หรือไม่ และเมื่อได้ผลลัพธ์แล้ว ต้องคำนึงถึงพฤติกรรมของผลลัพธ์ที่จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตัวแปรในการออกแบบของปัญหาเปลี่ยนแปลงไป นั่นคือจะต้องมีการวิเคราะห์ความไว ซึ่งการวิเคราะห์ความไวนี้มีความสำคัญมาก เพราะว่าถ้าตัวแปรในการออกแบบของปัญหาที่ศึกษาไม่อาจประมาณค่าได้แน่นอน จะต้องหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมจากค่าต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้เคียง

5.4.4 การทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้

ถ้าหากผลที่ได้ถูกต้องและน่าเชื่อถือได้จะต้องสามารถทดสอบได้โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ข้อมูลในอดีตกับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง ๆ อย่างไรก็ตามการทดสอบความถูกต้องไม่เหมาะสมกับปัญหาที่ไม่เคยเกิดมาก่อน เพราะจะไม่มีข้อมูลในอดีตที่จะนำมาเปรียบเทียบได้

5.4.5 การนำผลลัพธ์หรือค่าคำตอบไปใช้งาน

จะต้องทำการแปลผลลัพธ์ที่ได้ให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานได้ และเมื่อนำไปใช้งานแล้วควรทำการประเมินผลการใช้งานเพื่อนำข้อบกพร่องที่ได้มาปรับปรุงและแก้ไขให้เป็นที่น่าพอใจตามความต้องการต่อไป เพราะในบางครั้งผลลัพธ์ที่ได้ไม่สามารถทำให้เป็นจริงตามที่เราร้องขอได้หรือไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ

5.5 ประเภทของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

ลักษณะของปัญหาและตัวแปรในการออกแบบของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นสิ่งที่เราควรให้ความสำคัญ เพราะวิธีการทางการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแต่ละวิธีจะมีข้อจำกัดในการใช้แก้ปัญหาแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของปัญหา ประเภทของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถแบ่งตามลักษณะต่าง ๆ ได้ 6 ประเภทคือ

1. แบ่งตามสมการขอบเขต คือ ปัญหาที่มีสมการกำหนดขอบเขตของการออกแบบ และปัญหาที่ไม่กำหนดสมการขอบเขต
2. แบ่งตามลักษณะของตัวแปรในการออกแบบ คือ ถ้าสมการเป้าหมายมีตัวแปรในการออกแบบเพียงหนึ่งตัวจะเรียกปัญหาแบบนั้นว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตัวแปรเดียว (Single-variable optimization) ถ้าสมการเป้าหมายมีตัวแปรในการออกแบบสองหรือมากกว่านั้นเรียกว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายตัวแปร (Multi-variable optimization) หรือถ้าค่าของตัวแปรในการออกแบบเป็นจำนวนเต็มเรียกปัญหานี้ว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบจำนวนเต็ม (Integer optimization) เป็นต้น
3. แบ่งตามลักษณะของสมการเป้าหมาย คือ สมการเป้าหมายในการออกแบบมีทั้งแบบเป้าหมายเดียวและเป้าหมายหลายเป้าหมาย สมการเป้าหมายเดียวคือปัญหาที่มีจำนวนของสมการเป้าหมายเพียงสมการเดียว ส่วนสมการเป้าหมายหลายเป้าหมายคือปัญหาที่มีจำนวนของสมการเป้าหมายมากกว่าหนึ่งสมการเป้าหมาย
4. แบ่งตามลักษณะความสัมพันธ์ของสมการเป้าหมาย คือ ถ้าสมการเป้าหมายมีความสัมพันธ์ของสมการเป้าหมายเป็นแบบเชิงเส้นจะเรียกปัญหานี้ว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบโปรแกรมเชิงเส้น(Linear Programming, LP) หรือถ้าสมการเป้าหมายมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นจะเรียกว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโปรแกรมไม่เชิงเส้น(Nonlinear Programming, NLP)

5. แบ่งตามลักษณะของสมการเป้าหมายที่ขึ้นกับเวลา คือ ถ้าปัญหาเป็นปัญหาที่ขึ้นอยู่กับเวลาจะเรียกปัญหาแบบนั้นว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบพลวัต(Dynamic optimization) ถ้าเป็นปัญหาที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาจะเรียกว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบสถิตย์(Static optimization)

6. แบ่งตามลักษณะของข้อมูล คือ ถ้าปัญหาที่มีทราบค่าของข้อมูลที่แน่นอนจะเรียกปัญหานั้นว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบทราบค่าแน่นอน(Deterministic optimization) ส่วนปัญหาที่ไม่สามารถทราบค่าข้อมูลได้อย่างแน่นอนจะเรียกว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบทราบค่าไม่แน่นอน(Stochastic optimization)

5.6 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

วิธีการหาค่าคำตอบของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถแบ่งได้ 4 วิธีคือ

5.6.1 วิธีการกราฟ(Graphical Method)

เป็นวิธีที่ต้องพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมการเป้าหมายและตัวแปรในการออกแบบ ข้อจำกัดของวิธีนี้คือใช้ได้กับปัญหาหนึ่งมิติและสองมิติเท่านั้น กล่าวคือจำนวนตัวแปรในการออกแบบสูงสุดที่จะใช้วิธีนี้ได้ต้องไม่เกินสองตัว

5.6.2 วิธีการวิเคราะห์(Alytical Technique)

สิ่งสำคัญของปัญหาที่จะใช้วิธีการวิเคราะห์ในการหาค่าคำตอบ คือสมการความสัมพันธ์จะต้องสามารถหาอนุพันธ์ได้และความสัมพันธ์ของสมการต้องเป็นแบบต่อเนื่อง เพราะในการหาคำตอบของปัญหาจะใช้วิธีหาอนุพันธ์ของสมการเป้าหมาย ถ้าปัญหาเป็นแบบที่มีสมการขอบเขตจำกัดจะใช้วิธีตัวคูณของลากรองจ์ (Lagrange multipliers) ทำการแปลงสมการขอบเขตให้เป็นเทอมที่เพิ่มขึ้นของสมการเป้าหมายจะทำให้ปัญหากลายเป็นปัญหาที่ไม่มีสมการขอบเขตจำกัด

5.6.3 วิธีการทดลอง(Experimental Technique)

วิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องแปลงปัญหาให้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ เป็นการทดลองหาคำตอบทุกทางเลือกที่เป็นได้ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ได้หาคำตอบที่เหมาะสม วิธีการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมกับปัญหาที่ไม่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรในการออกแบบไม่มากนัก เพราะถ้าเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนและตัวแปรในการออกแบบมีจำนวนมาก ใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบนานและมีค่าใช้จ่ายมากกว่าวิธีอื่น

5.6.4 วิธีเชิงตัวเลข(Numerical Technique)

วิธีเชิงตัวเลขเป็นวิธีที่ทำซ้ำเพื่อหาคำคำตอบที่เหมาะสมที่สุด สามารถแยกประเภทได้จากหลายลักษณะคือ สามารถแบ่งได้จากลักษณะของสมการเป้าหมายและจากลักษณะของปัญหาที่มีเงื่อนไขบังคับหรือไม่เงื่อนไขบังคับ เป็นต้น

5.7 ประโยชน์ของการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้กับการออกแบบ

ประโยชน์ของการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาประยุกต์ใช้หรือนำไปใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ในการออกแบบมีดังนี้ คือ

1. สามารถลดเวลาในการออกแบบได้ กล่าวคือ โดยทั่วไปในการออกแบบนั้นค่าของตัวแปรในการออกแบบแต่ละตัวเราไม่อาจทราบได้ เมื่อเราไม่ทราบค่าของตัวแปรในการออกแบบดังกล่าว ทำให้เราจำเป็นต้องสุ่มค่าตัวแปรในการออกแบบเพื่อนำไปออกแบบจริง โดยที่เราไม่ทราบว่าค่าตัวแปรนั้นจะทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นตามที่เรากำหนดไว้ตั้งแต่ต้นหรือไม่ ถ้าผลลัพธ์ที่ได้ไม่เป็นไปตามต้องการก็ต้องทำการสุ่มค่าตัวแปรในการออกแบบใหม่ จะทำให้เสียเวลาในขั้นตอนนี้มากและทำให้ค่าใช้จ่ายมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อเรานำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการหาค่าของตัวแปรในการออกแบบที่เหมาะสมจะทำให้เราประหยัดเวลาได้และยังช่วยให้ลดค่าใช้จ่ายในขั้นตอนนี้ลงได้อีกด้วย
2. สามารถนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปช่วยในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้มากยิ่งขึ้น
3. ทำให้ขั้นตอนในการออกแบบหรือขั้นตอนพัฒนาผลิตภัณฑ์ ใช้จำนวนคนและเครื่องจักรน้อยลงและสามารถลดค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นในตอนนี้ได้
4. สามารถนำประสบการณ์ของผู้ออกแบบหรือปัญหาที่พบมาช่วยในการกำหนดสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขบังคับ เพื่อให้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นตัวแทนของปัญหาอย่างแท้จริง ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่เราควรให้ความสำคัญและมีความระมัดระวังในการกำหนดขอบเขตและลักษณะของปัญหา เพราะถ้าไม่มีความเข้าใจในปัญหาหรือความต้องการที่แท้จริง คำตอบที่ได้จากการใช้วิธีการของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดก็ไม่สามารถแก้ปัญหาได้จริงหรือในบางครั้งไม่สามารถหาคำคำตอบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เมื่อนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการออกแบบ สามารถเปลี่ยนค่าตัวแปรในการออกแบบได้ที่หลายตัว และสามารถเปลี่ยนสมการเงื่อนไขบังคับได้ เพื่อให้สมการดังกล่าวแทนปัญหาอย่างแท้จริง ซึ่งถ้าเราใช้วิธีพล็อตกราฟหรือใช้ตารางจะมีความยุ่งยากมากและใช้เวลานาน เป็นต้น

5.8 ข้อจำกัดของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

1. ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรในการออกแบบ ถ้าจำนวนของตัวแปรในการออกแบบมีปริมาณมากจะเสียเวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นในการออกแบบควรคำนึงถึงจำนวนของตัวแปรในการออกแบบให้มีความเหมาะสมในการออกแบบแต่ละครั้ง เพราะบางตัวแปรก็มีผลต่อค่าคำตอบของสมการเป้าหมายน้อยมาก
2. การกำหนดปัญหาถ้ากำหนดเป้าหมายไม่ถูกต้องและเข้าใจยาก เมื่อนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการแก้ปัญหาจะใช้เวลาในการแก้ปัญหา นาน หรือในบางกรณีไม่สามารถหาค่าคำตอบได้
3. วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะมีความยุ่งยากมาก เมื่อนำไปใช้แก้ปัญหาที่มีความสัมพันธ์ของสมการเป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องและเป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นมาก ๆ จะทำให้หาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ยาก และใช้เวลาในการคำนวณนานหรือในบางครั้งก็ไม่สามารถหาค่าที่เหมาะสมได้
4. คำตอบที่ได้จากการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด อาจจะไม่ใช่คำตอบที่แท้จริง (global solution) ของปัญหา ดังนั้นจะต้องทำการตรวจสอบให้แน่ชัด โดยทำการเปลี่ยนค่าเริ่มต้นหลาย ๆ ค่า เพื่อดูว่าคำตอบที่ได้ยังเป็นค่าเดิมหรือไม่ ถ้ายังเป็นค่าเดิมแสดงว่าคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่แท้จริง
5. วิธีการทุกวิธีของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไม่สามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาได้ทุกปัญหา เพราะวิธีการบางวิธีมีข้อจำกัดหรือมีขั้นตอนที่แตกต่างกันไป เช่น วิธี Quasi-Newton ใช้ได้กับปัญหาที่สามารถหาอนุพันธ์ได้เท่านั้น เป็นต้น ดังนั้นในการเลือกวิธีของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปใช้งานจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของวิธีนั้น ๆ ด้วย

5.9 การเลือกวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอเทคนิคในส่วนของ Unconstrained Optimization ซึ่งเทคนิคดังกล่าวได้ถูกแบ่งออกเป็นสองแบบหลักๆ นั่นคือแบบ Direct Search Methods กับแบบ Descent Methods ซึ่งทั้งสองแบบมีข้อแตกต่างกันตรงที่แบบ Direct Search Methods นั้นไม่จำเป็นต้องทำการหาอนุพันธ์ของ Objective Function เทคนิค Unconstrained Optimization ทั้งสองแบบสามารถแบ่งได้อย่างย่อยๆ ได้อีกหลากหลายวิธีตามตารางดังนี้

Direct Search Methods ^a	Descent Methods ^b
Random search method	<i>Cauchy method</i>
Grid search method	Fletcher-Reeves method
Univariate method	Newton's method
Pattern search method	Marquardt method
Rosenbrock's method	<i>Davidon-Fletcher-Powell method</i>
Simplex method	<i>Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno method</i>

^aDo not require the derivatives of the function.

^bRequire the derivatives of the function.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอเทคนิคแบบ Descent Methods โดยได้นำหลักการของสามวิธีคือ Cauchy Method, Davidon-Fletcher-Powell method และ Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno method ใช้ร่วมกับการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษาฟอร์แทรน ซึ่งทำให้สามารถหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องสูง และสามารถบอกได้ว่าวิธีใดที่มีประสิทธิภาพมากกว่ากัน โดยนำค่าต่างๆ ที่คำนวณได้ในแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกันในเชิงของเวลาในการคำนวณ (iteration time) และ ค่าความผิดพลาด (approximation error) ที่เกิดขึ้นของแต่ละวิธี

5.10 การทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์

พิจารณาสมการ objective function ดังนี้

$$f(x_1, x_2) = \frac{540}{x_1} + \frac{540}{x_2} + 2.5x_1x_2 \quad (5.1)$$

เมื่อเราได้สมการ objective function คือสมการ (5.1) เรียบร้อยแล้ว เราจะได้ทำการแก้สมการดังกล่าวด้วย optimization techniques ซึ่งประกอบด้วยวิธี Cauchy , Davidon-Fletcher-Powell (DFP) และ Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)

ทฤษฎีของทั้งสามเทคนิคนี้ได้ถูกออกแบบมาให้ทำงานเป็นแบบวนลูป ซึ่งถ้ายังไม่ได้คำตอบในครั้งแรกก็ให้ทำการวนหาต่อไปจนกว่าจะได้คำตอบ ซึ่งหลักการนี้เรียกว่าวิธีหาคำตอบแบบการทำซ้ำ (Iteration) ส่วนใหญ่วิธีหาคำตอบแบบนี้เรามักใช้ร่วมกับการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งสามโปรแกรมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แต่ละวิธีสามารถอธิบายได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

5.10.1 วิธี Cauchy

- step 1.ที่ $k = 1$ เริ่มด้วยการกำหนดค่าเริ่มต้นของ $[x]^{k=1}$
- step 2.ตรวจสอบเงื่อนไข $k = 1$ ถ้าเป็นจริงให้ไปทำ step 3. ถ้าเป็นเท็จข้ามไปทำ step 7.
- step 3.หาค่า search direction $[s]^k$ จาก $[s]^k = -\nabla f^k$
- step 4.หา optimal step length λ^* จากโปรแกรมย่อยที่ชื่อ falpha โดยต้อง input ค่า $[x]^k, [s]^k$ เข้าไปในโปรแกรมย่อยดังกล่าว
- step 5.กำหนดให้ค่า $[x]^{k+1} = [x]^k + \lambda^*[s]^k$
- step 6.ตรวจสอบเงื่อนไข $\varepsilon_n \leq \varepsilon_r$ ถ้าเป็นจริง โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้จบลง ถ้าเป็นเท็จ โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้เริ่มต้นทำซ้ำใหม่อีกครั้ง โดยกำหนดให้ $k = k + 1$ ใน step 2.
- step 7. หาค่า search direction $[s]^k$ จาก $[s]^k = -\nabla f^k$
- step 8.หา step length λ^* จากโปรแกรมย่อยที่ชื่อ falpha โดยต้อง input ค่า $[x]^k, [s]^k$ เข้าไปในโปรแกรมย่อยดังกล่าว
- step 9.กำหนดให้ค่า $[x]^{k+1} = [x]^k + \lambda^*[s]^k$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

step 10. ตรวจสอบเงื่อนไข $\varepsilon_a \leq \varepsilon_s$ ถ้าเป็นจริง โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้จบลง ถ้าเป็นเท็จ โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้เริ่มต้นทำซ้ำใหม่อีกครั้ง โดยกำหนดให้ $k = k + 1$ ใน step 2.

โปรแกรมการคำนวณจะทำซ้ำในลักษณะเดิมเช่นนี้จนกว่าเงื่อนไข $\varepsilon_a \leq \varepsilon_s$ จะเป็นจริงจากนั้น โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้จบลงเมื่อ ε_a คือค่าความผิดพลาดโดยประมาณ (approximate error) = $|\nabla f|$ และค่า ε_s คือค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (stop error) ซึ่งเราจะเป็นผู้กำหนด

5.10.2 วิธี Davidon-Fletcher-Powell

step 1. ที่ $k = 1$ เริ่มด้วยการกำหนดค่าเริ่มต้นของ $[x]^{k=1}$ และ $[B]^{k=1} = [I]$

step 2. ตรวจสอบเงื่อนไข $k = 1$ ถ้าเป็นจริงให้ไปทำ step 3. ถ้าเป็นเท็จข้ามไปทำ step 7.

step 3. หาค่า search direction $[s]^k$ จาก $[s]^k = -[B]^k \nabla f^k$

step 4. หา optimal step length λ^* จากโปรแกรมย่อยที่ชื่อ falpha โดยต้อง input ค่า $[x]^k, [s]^k$ เข้าไปในโปรแกรมย่อยดังกล่าว

step 5. กำหนดให้ค่า $[x]^{k+1} = [x]^k + \lambda^* [s]^k$

step 6. ตรวจสอบเงื่อนไข $\varepsilon_a \leq \varepsilon_s$ ถ้าเป็นจริง โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้จบลง ถ้าเป็นเท็จ โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้เริ่มต้นทำซ้ำใหม่อีกครั้ง โดยกำหนดให้ $k = k + 1$ ใน step 2.

step 7. หาค่า search direction $[s]^k$ จาก $[s]^k = -[B]^k \nabla f^k$

ที่ $k \geq 2$ ปรับปรุงเมตริกซ์ $[B]^{k-1}$ ให้เป็น $[B]^k$ โดยที่

$$[B]^k = [B]^{k-1} + [M]^k + [N]^k$$

$$\text{เมื่อ } [M]^k = \lambda^* \begin{pmatrix} [s]^{k-1} [s]^{k-1T} \\ [s]^{kT} [gg]^k \end{pmatrix}$$

$$[N]^k = - \begin{pmatrix} [B]^{k-1} [gg]^k [B]^{k-1} [gg]^{kT} \\ [gg]^{kT} [B]^{k-1} [gg]^k \end{pmatrix}$$

$$\text{และ } [gg]^k = \nabla f^k - \nabla f^{k-1}$$

step 8. หา step length λ^* จากโปรแกรมย่อยที่ชื่อ falpha โดยต้อง input ค่า $[x]^k, [s]^k$ เข้าไปในโปรแกรมย่อยดังกล่าว

step 9. กำหนดให้ค่า $[x]^{k+1} = [x]^k + \lambda^* [s]^k$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

step 10. ตรวจสอบเงื่อนไข $\varepsilon_a \leq \varepsilon_s$ ถ้าเป็นจริง โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้จบลง ถ้าเป็นเท็จ โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้เริ่มต้นทำซ้ำใหม่อีกครั้ง โดยกำหนดให้ $k = k + 1$ ใน step 2.

โปรแกรมการคำนวณจะทำซ้ำในลักษณะเดิมเช่นนี้จนกว่าเงื่อนไข $\varepsilon_a \leq \varepsilon_s$ จะเป็นจริงจากนั้น โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้จบลงเมื่อ ε_a คือค่าความผิดพลาดโดยประมาณ (approximate error) = $|\nabla f|$ และค่า ε_s คือค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (stop error) ซึ่งเราจะเป็นผู้กำหนด

5.10.3 วิธี Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno

step 1. ที่ $k = 1$ เริ่มด้วยการกำหนดค่าเริ่มต้นของ $[x]^{k=1}$ และ $[B]^{k=1} = [I]$

step 2. ตรวจสอบเงื่อนไข $k = 1$ ถ้าเป็นจริงให้ไปทำ step 3. ถ้าเป็นเท็จข้ามไปทำ step 7.

step 3. หาค่า search direction $[s]^k$ จาก $[s]^k = -[B]^k \nabla f^k$

step 4. หา optimal step length λ^* จากโปรแกรมย่อยที่ชื่อ falpha โดยต้อง input ค่า $[x]^k, [s]^k$ เข้าไปในโปรแกรมย่อยดังกล่าว

step 5. กำหนดให้ค่า $[x]^{k+1} = [x]^k + \lambda^* [s]^k$

step 6. ตรวจสอบเงื่อนไข $\varepsilon_a \leq \varepsilon_s$ ถ้าเป็นจริง โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้จบลง ถ้าเป็นเท็จ โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้เริ่มต้นทำซ้ำใหม่อีกครั้ง โดยกำหนดให้ $k = k + 1$ ใน step 2.

step 7. หาค่า search direction $[s]^k$ จาก $[s]^k = -[B]^k \nabla f^k$

ที่ $k \geq 2$ ปรับปรุงเมตริกซ์ $[B]^{k-1}$ ให้เป็น $[B]^k$ โดยที่

$$[B]^k = [B]^{k-1} + \left(1 + \frac{[gg]^{kT} [B]^{k-1} [gg]^k}{[d]^{kT} [gg]^k} \right) \frac{[d]^k [d]^{kT}}{[d]^{kT} [gg]^k} - \frac{[d]^k [gg]^{kT} [B]^{k-1}}{[d]^{kT} [gg]^k} - \frac{[B]^{k-1} [gg]^k [d]^{kT}}{[d]^{kT} [gg]^k}$$

$$\text{และ } [gg]^k = \nabla f^k - \nabla f^{k-1}$$

$$[d]^k = [x]^k - [x]^{k-1}$$

step 8. หา step length λ^* จากโปรแกรมย่อยที่ชื่อ falpha โดยต้อง input ค่า $[x]^k, [s]^k$ เข้าไปในโปรแกรมย่อยดังกล่าว

step 9. กำหนดให้ค่า $[x]^{k+1} = [x]^k + \lambda^* [s]^k$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

step 10. ตรวจสอบเงื่อนไข $\varepsilon_n \leq \varepsilon_s$ ถ้าเป็นจริง โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้จบลง ถ้าเป็นเท็จ โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้เริ่มต้นทำซ้ำใหม่อีกครั้ง โดยกำหนดให้ $k = k + 1$ ใน step 2.

โปรแกรมการคำนวณจะทำซ้ำในลักษณะเดิมเช่นนี้จนกว่าเงื่อนไข $\varepsilon_n \leq \varepsilon_s$ จะเป็นจริงจากนั้น โปรแกรมการคำนวณจะถูกสั่งให้จบลงเมื่อ ε_n คือค่าความผิดพลาดโดยประมาณ (approximate error) = $|\nabla f|$ และค่า ε_s คือค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (stop error) ซึ่งเราจะเป็นผู้กำหนด โดยในโปรแกรม Cauchy, Davidon-Fletcher-Powell และ Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno ทั้งสามโปรแกรมนี้ได้ถูกกำหนดให้ $\varepsilon_s = 0.0001\%$ เช่นเดียวกัน

5.10.4 การทำงานของโปรแกรมน้อยที่ชื่อ falpha

โปรแกรมน้อยที่ชื่อ falpha ย่อมาจาก “find alpha” มันถูกสร้างขึ้นเพื่อทำหน้าที่ตามชื่อของมันนั่นคือการหาค่า alpha (λ^*) ที่จุด optimum โดยมีค่า $[x]^i, [s]^i$ เป็นค่า input ของโปรแกรมน้อยชุดนี้ ซึ่งกระบวนการทั้งหมดของโปรแกรมน้อย falpha สามารถอธิบายได้ดังนี้

step 1. เริ่มต้นด้วยการรับค่า input $[x]^i, [s]^i$ มาจาก โปรแกรมหลัก (main program)

step 2. กำหนดค่าเริ่มต้นของ $\lambda^{i+1} = 0.001$

step 3. คำนวณค่า $[x]^{i+1}$ โดยที่

$$[x]^{i+1} = [x]^i + \lambda^i [s]^i$$

step 4. คำนวณค่า $f([x]^{i+1})$

step 5. กำหนดให้ $\lambda^{i+1} = \lambda^i + 0.001$

Step 6. คำนวณค่า $[nx]^{i+1}$ โดยที่

$$[nx]^{i+1} = [x]^i + \lambda^{i+1} [s]^i$$

step 7. คำนวณค่า $nf([nx]^{i+1})$

step 8. ตรวจสอบเงื่อนไข $[nf]^{i+1} > [f]^{i+1}$ ถ้าเป็นจริง ให้ข้ามไปทำ step 10.

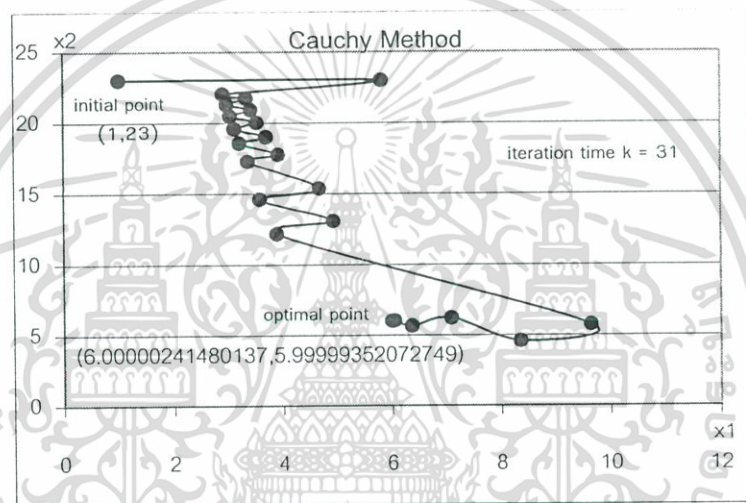
ถ้าเป็นเท็จทำ step 9. ต่อไป

step 9. กำหนดให้ $[f]^{i+1} = [nf]^{i+1}$ จากนั้นเริ่มไปทำใหม่ที่ step 3.

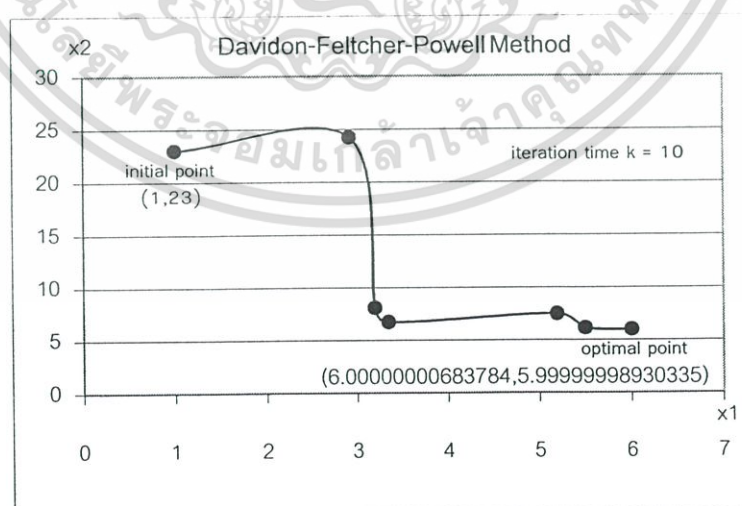
step 10. ส่งค่า λ^i กลับไปยังโปรแกรมหลัก (main program) เพราะ $\lambda^i = \lambda^*$

5.11 ผลการทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การทดสอบ โปรแกรมแต่ละ โปรแกรมทำโดยการกำหนดค่าเริ่มต้นแบบสุ่มสำหรับปัญหา ในที่นี้เราได้ทำการสุ่มค่าให้ $x_1=1$, $x_2=23$ เพื่อดูพฤติกรรมการลู่เข้าหาผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ ด้วยโปรแกรมทั้งสามวิธี มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 5.1 , 5.2 และ 5.3 ซึ่งเป็นกราฟที่พล็อตมาจากวิธี Cauchy , Davidon-Fletcher-Powell (DFP) ,and Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno ตามลำดับ โดยที่ค่า k เป็นจำนวนครั้งที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อพิจารณาจากกราฟทั้ง สามรูปทำให้ทราบได้ว่าพฤติกรรมการลู่เข้าหาจุด optimal point มีลักษณะที่แตกต่างกัน และแตกต่างกันที่เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (iteration time) อีกด้วย ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทั้งสามวิธีมีความถูกต้องสูง โดยมีค่าความผิดพลาดโดยประมาณของทั้งสามวิธีมีค่าน้อยกว่า 0.0001%

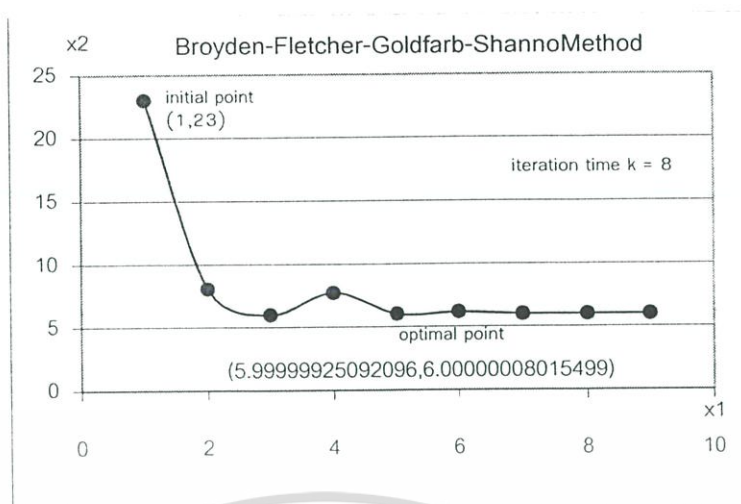


รูปที่ 5.1 พฤติกรรมการลู่เข้าหาคำตอบคำนวณด้วยวิธี Cauchy

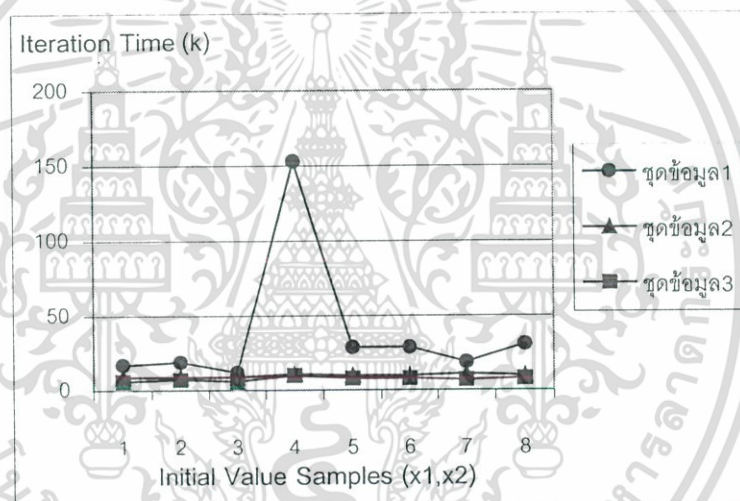


รูปที่ 5.2 พฤติกรรมการลู่เข้าหาคำตอบคำนวณด้วยวิธี Davidon-Feltcher-Powell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 พฤติกรรมการลู่อู่หาคำตอบคำนวณด้วยวิธี
Broyden-Fletcher-Goldfarb-shanno



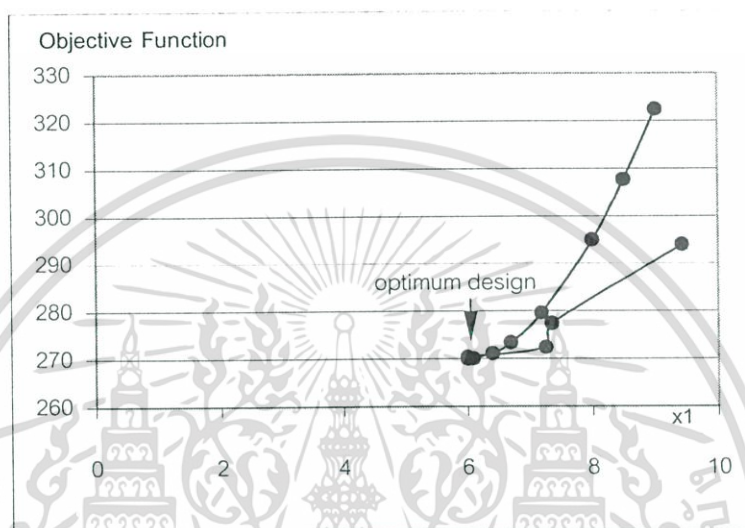
รูปที่ 5.4 แสดงภาพรวมของเวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธี Cauchy,
Davidon-Fletcher-Powell และ Broyden-Fletcher-Goldfarb-
Shanno ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่ 1,2 และ 3 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.4 เราได้ทำการสุ่มค่าเริ่มต้น (Initial Value Samples) ที่จุด (x_1, x_2) ที่แตกต่างกัน ทั้งแปดจุดดังนี้ $(1,2)$, $(80,89)$, $(12,16)$, $(59,14)$, $(50,60)$, $(60,50)$, $(24,32)$ และที่ $(1,23)$ จุดประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบภาพรวมของประสิทธิภาพการคำนวณเชิงค่าเริ่มต้น โดยกำหนดค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกัน ทำให้ทราบชัดเจนว่าวิธีของ BFGS Method และ DFP Method มีประสิทธิภาพในการคำนวณอยู่ในระดับที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน สำหรับวิธี Cauchy Method นั้นโดยทั่วไปก็จะมีประสิทธิภาพด้อยกว่าสองวิธีแรกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่วิธี Cauchy มีข้อดีกว่าตรงที่มันเป็นวิธีที่ง่ายในการทำความเข้าใจและโปรแกรม Cauchy สามารถถูกประดิษฐ์ขึ้นได้ง่ายกว่าสองวิธีแรกค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตาม

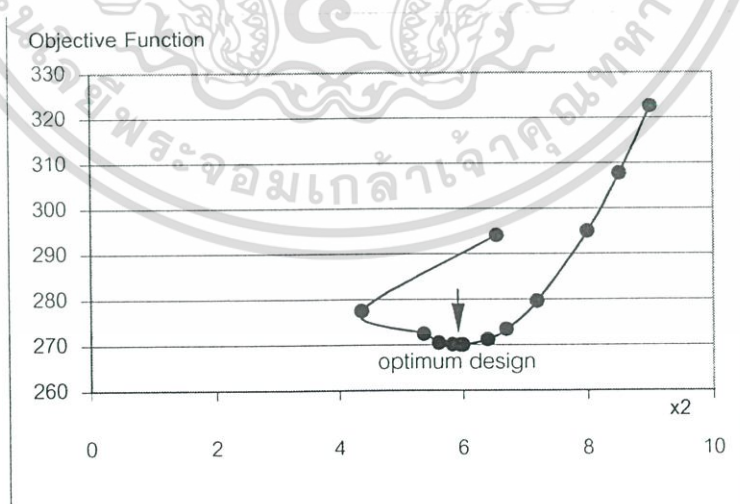
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าค่าเริ่มต้นที่ถูกใส่เข้าไปในโปรแกรม Cauchy เป็นค่าที่ไม่เหมาะสมแล้วดังเช่นค่า (59,14) ที่ simple ที่ 4 ในรูป ที่ 5.4 ก็จะทำให้ประสิทธิภาพการคำนวณของวิธี Cauchy ต้อยลงไปว่าสองวิธีแรกมากเลยทีเดียว

ต่อไปเราจะแสดงให้เห็นพฤติกรรมการลู่เข้าหาผลลัพธ์ด้วยวิธี Cauchy โดยพล็อตกราฟ objective function เทียบกับ x_1 และเทียบกับ x_2 ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ



รูปที่ 5.5 แสดงพฤติกรรมการลู่เข้าหาผลลัพธ์ x_1 ด้วยวิธี Cauchy โดยกำหนดค่าเริ่มต้นที่ $x_1=12$, $x_2=14$



รูปที่ 5.6 แสดงพฤติกรรมการลู่เข้าหาผลลัพธ์ x_2 ด้วยวิธี Cauchy โดยกำหนดค่าเริ่มต้นที่ $x_1=12$, $x_2=14$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ได้แสดงพฤติกรรมการลู่เข้าหาผลลัพธ์ด้วยวิธี Cauchy สำหรับค่าเริ่มต้นที่ $x_1=12$, $x_2=14$ ซึ่งในที่นี้เราได้แสดงเฉพาะวิธี Cauchy เท่านั้น เนื่องจากได้ทำการทดสอบรันโปรแกรมทั้งสามวิธีข้างต้นหลายครั้ง ทำให้สังเกตเห็นว่าพฤติกรรมของตัวเลขที่คำนวณได้จากสามวิธีข้างต้นนั้น ตัวเลขมีลักษณะการลู่เข้าหาผลลัพธ์คล้ายกันและสอดคล้องกันทุกวิธี

และจากการคำนวณโดยคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีทั้งสามข้างต้น ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimum design) ของตัวแปรออกแบบ $x_1 \cong 6$, $x_2 \cong 6$

จากการทดสอบเทคนิคการอพติไมซ์เซชันของทั้งสามวิธีทำให้ทราบว่า

1. จากกราฟรูป 5.1-5.4 ทำให้ทราบว่าวิธีของ Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) Methods มีประสิทธิภาพดีที่สุดในเชิงเวลาในการคำนวณ (iteration time) กล่าวคือใช้เวลาในการคำนวณสั้นกว่าเมื่อเทียบกับวิธี Cauchy Method และ Davidon-Fletcher-Powell (DFP) Method

2. ผลการรันโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากเทคนิค unconstrained optimization techniques ทั้งสามวิธีได้ค่าของผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการคำนวณหาค่าแม่นยำตรง (exact solution) ด้วยวิธี Lagrange Multiplier Method ผลปรากฏว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีทั้งสามข้างต้นมีความผิดพลาดไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น กล่าวคือมีความผิดพลาดโดยประมาณน้อยกว่า 0.0001 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น (approximate error < 0.0001%)

3. การเลือกการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด (optimization design) ด้วยเทคนิคแบบ unconstrained optimization techniques โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีของ Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) ร่วมกับการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นการเลือกวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม

บทที่ 6

การออกแบบออปติไมเซชัน (Optimal Design)

6.1 สมการวัตถุประสงค์ (Objective Function)

สมการวัตถุประสงค์

$$f_{objective} = \Delta \bar{T} + \omega \bar{Q} \quad (6.1)$$

เมื่อ ω คือค่าฟังก์ชันน้ำหนัก (Weight Function)

$\Delta \bar{T}$ คือค่าผลต่างอุณหภูมิรูปไร้มิติ, $\bar{T}_{max} - \bar{T}_{average}$

\bar{Q} คือค่าอัตราการไหลรูปไร้มิติ

เนื่องจากวัตถุประสงค์เพื่อทำการคำนวณหาค่า $\frac{C}{R}, \frac{D}{L}$ ที่ทำให้สมการวัตถุประสงค์ $f_{objective}$ มีค่าต่ำสุด พิจารณาสมการ (6.1) จะได้ว่า

1. $\Delta \bar{T}$ และ \bar{Q} เป็นตัวแปรออกแบบ (Design Variables)
2. $\Delta \bar{T}$ และ \bar{Q} อยู่ในเทอมของ $\frac{C}{R}, \frac{D}{L}$

เนื่องจากค่าตัวแปรออกแบบ $\Delta \bar{T}$ และ \bar{Q} มีค่าที่แตกต่างกับมากดังนั้นเราจึงใช้ค่าฟังก์ชันน้ำหนัก

1. เพื่อให้ค่าตัวแปรออกแบบ $\Delta \bar{T}$ และ \bar{Q} อยู่ในช่วงค่าการออกแบบเดียวกัน
2. เพื่อให้สามารถเพิ่มค่าฟังก์ชันน้ำหนักไปยังที่ตัวแปรออกแบบที่มีความสำคัญมากกว่าได้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกค่าฟังก์ชันน้ำหนัก $\omega = 410$

6.2 สมการเงื่อนไขบังคับ (Constraint Equation)

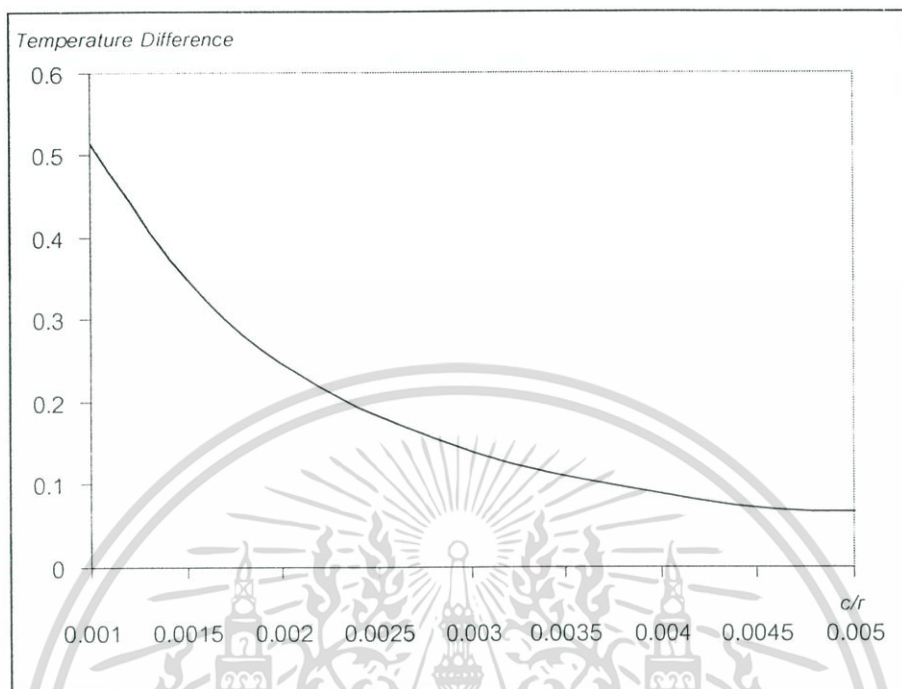
เงื่อนไขบังคับสำหรับการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของเบริงเพลากลมอยู่ในช่วง

$$0.001 < \frac{C}{R} < 0.005 \quad (6.2)$$

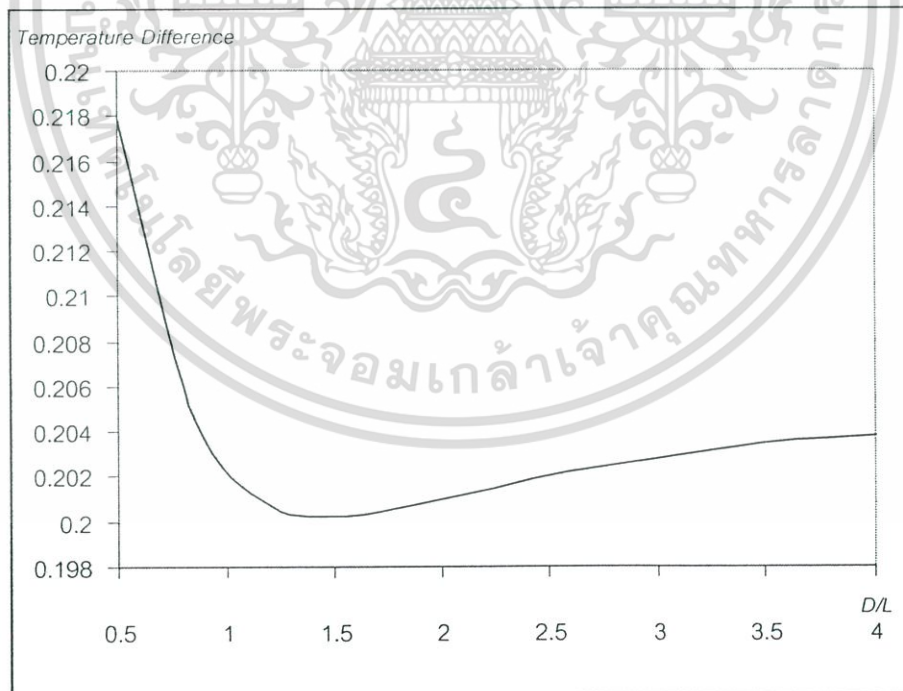
$$0.5 < \frac{D}{L} < 4.0 \quad (6.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ผลการออกแบบหาขนาดเบริงที่เหมาะสม (Optimal Design Result)

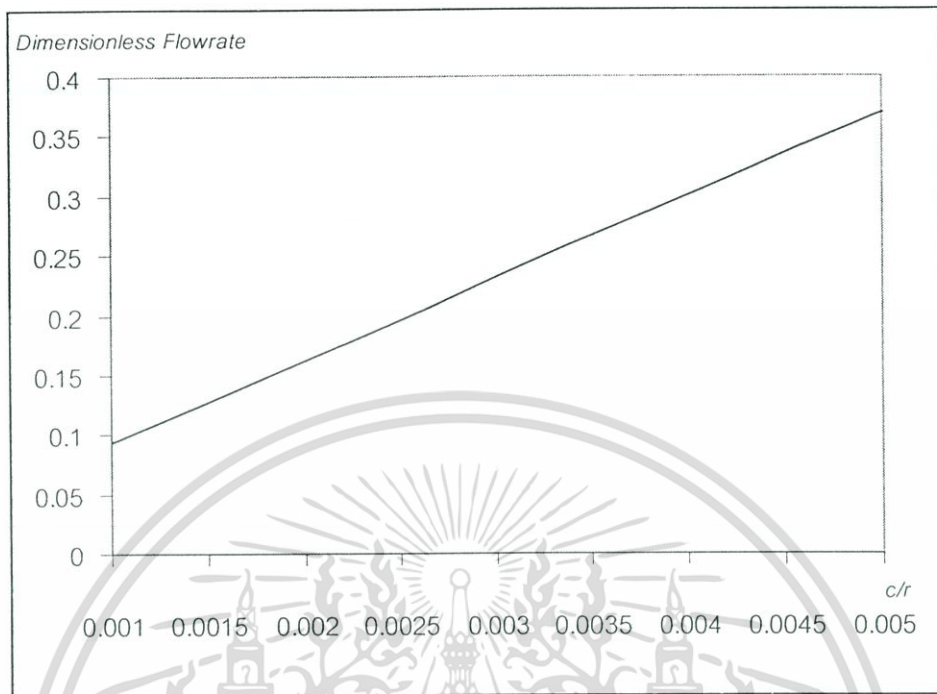


รูปที่ 6.1 แสดงค่าผลต่างของอุณหภูมิรูปไว้มิติเทียบกับแกน c/r

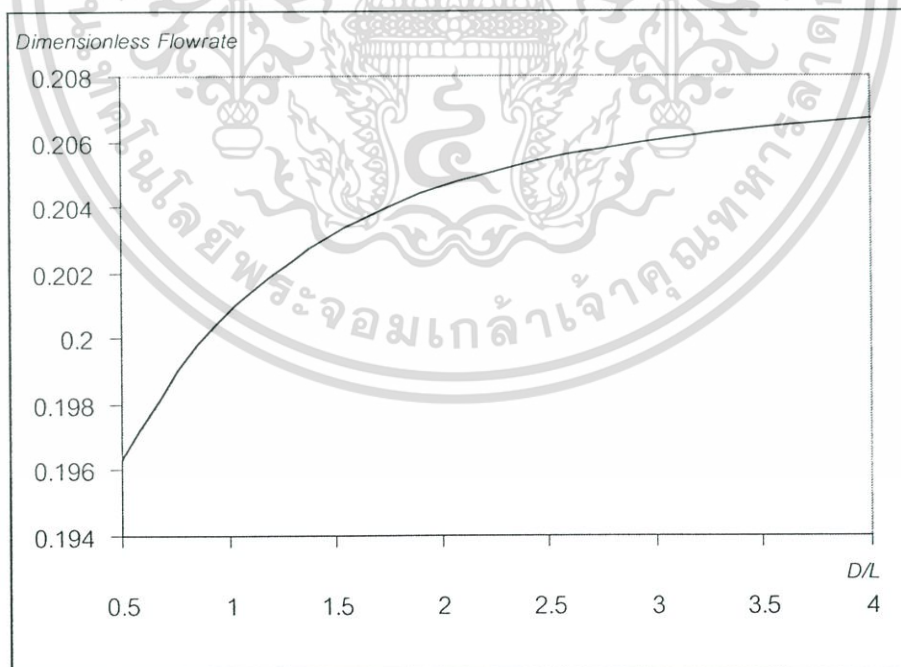


รูปที่ 6.2 แสดงค่าผลต่างของอุณหภูมิรูปไว้มิติเทียบกับแกน D/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

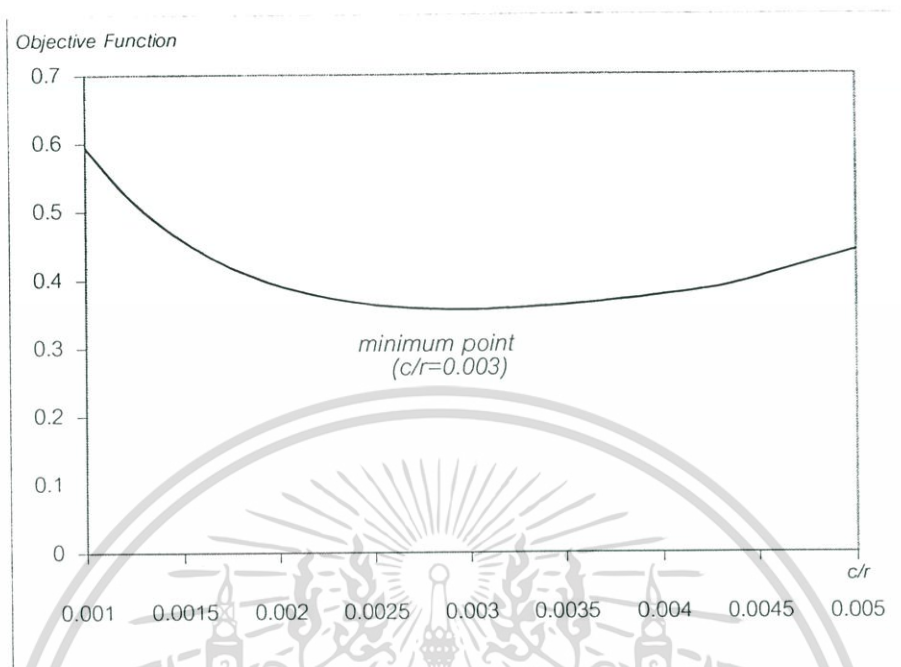


รูปที่ 6.3 แสดงค่าอัตราการไหลรูปไร้มิติเทียบกับแกน c/r

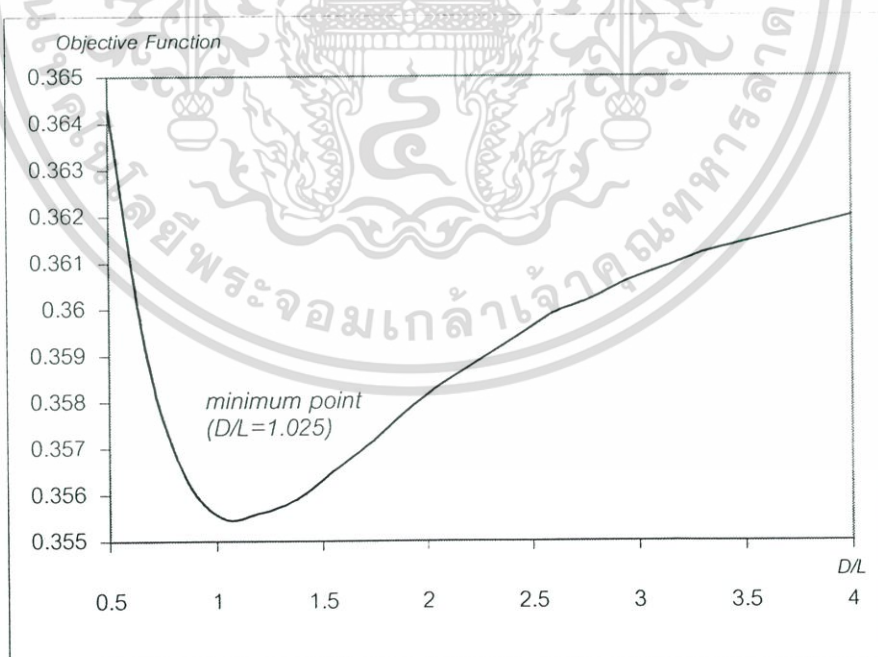


รูปที่ 6.4 แสดงค่าอัตราการไหลรูปไร้มิติเทียบกับแกน D/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

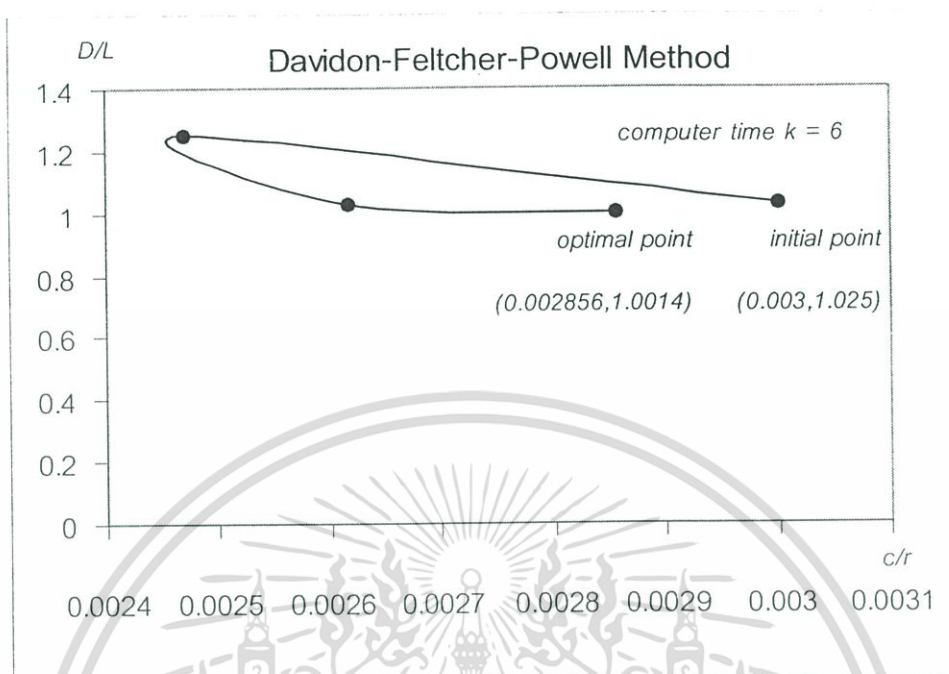


รูปที่ 6.5 แสดงค่าต่ำสุดของสมการวัตถุประสงค์เทียบกับแกน c/r
คำนวณ โดยวิธี Exhaustive Search

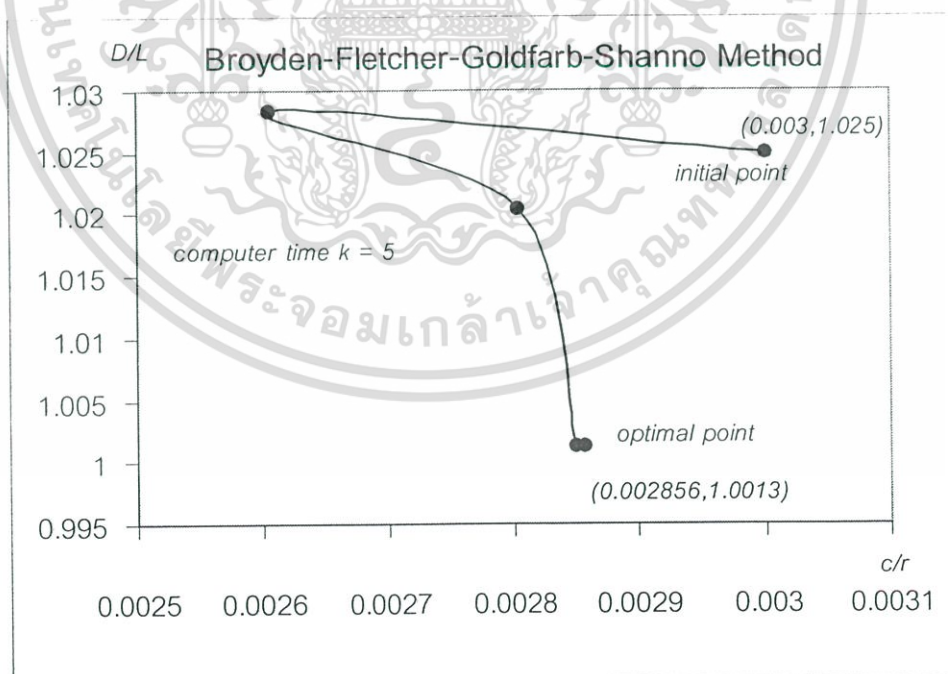


รูปที่ 6.6 แสดงค่าต่ำสุดของสมการวัตถุประสงค์เทียบกับแกน D/L
คำนวณ โดยวิธี Exhaustive Search

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

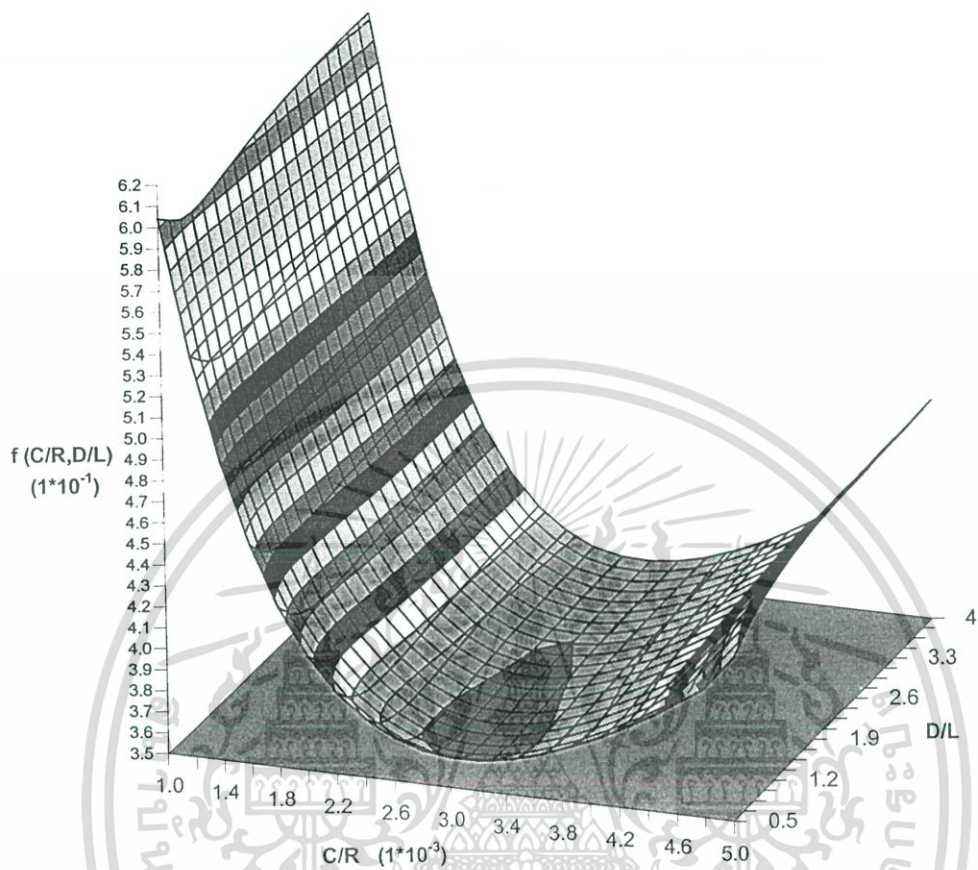


รูปที่ 6.7 แสดงพฤติกรรมการลู่เข้าหาจุดที่สมการวัตถุประสงค์มีค่าต่ำสุดของตัวแปรออกแบบ c/r และ D/L จำนวน โดยวิธี DFP



รูปที่ 6.8 แสดงพฤติกรรมการลู่เข้าหาจุดที่สมการวัตถุประสงค์มีค่าต่ำสุดของตัวแปรออกแบบ c/r และ D/L จำนวน โดยวิธี BFGS

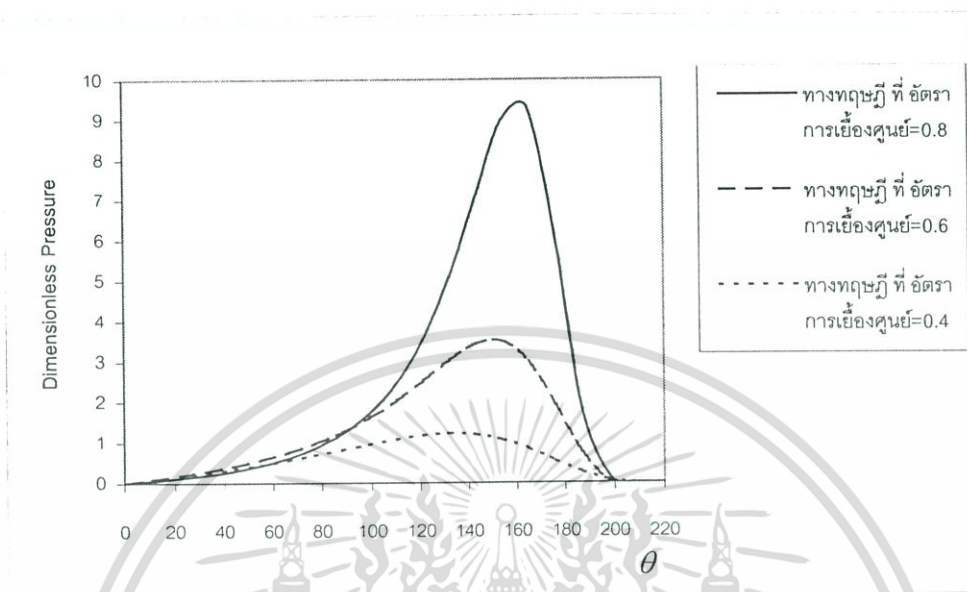
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



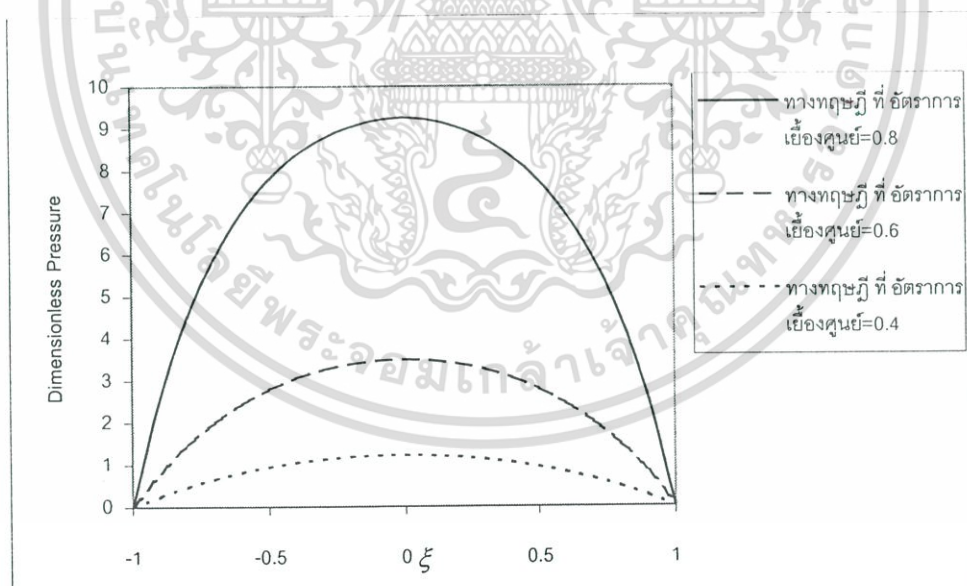
รูปที่ 6.9 แสดงกราฟสมการวัตถุประสงครูป 3 มิติ ที่คำนวณได้ เทียบกับแกน c/r และ D/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 ผลการคำนวณเพื่อศึกษาพฤติกรรมสถิตย์ของแบร็ริงขนาดที่เหมาะสม (Static Characteristics of Optimal Journal Bearing)

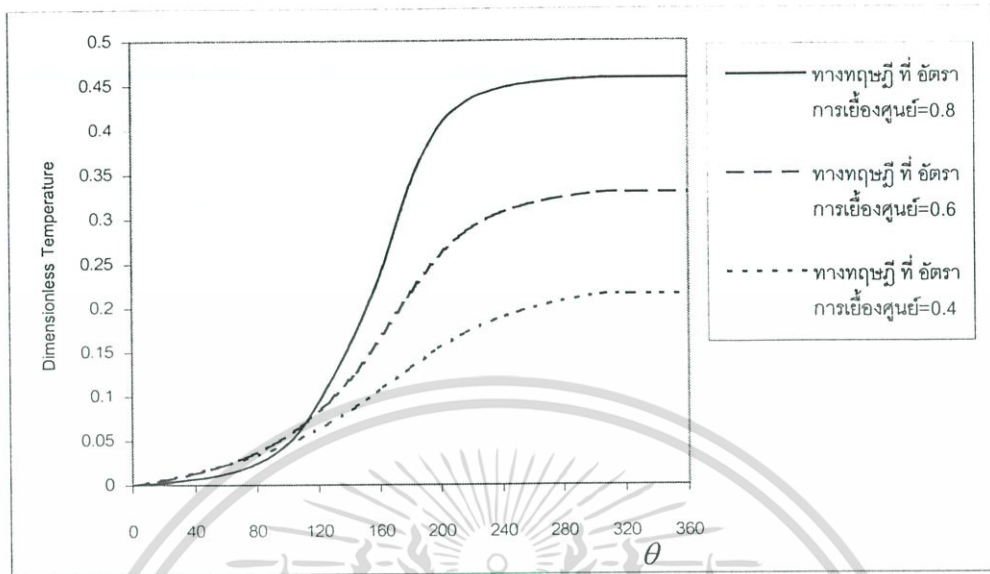


รูปที่ 6.10 แสดงพฤติกรรมของการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันรูป ไร้มิติเทียบกับแกน θ

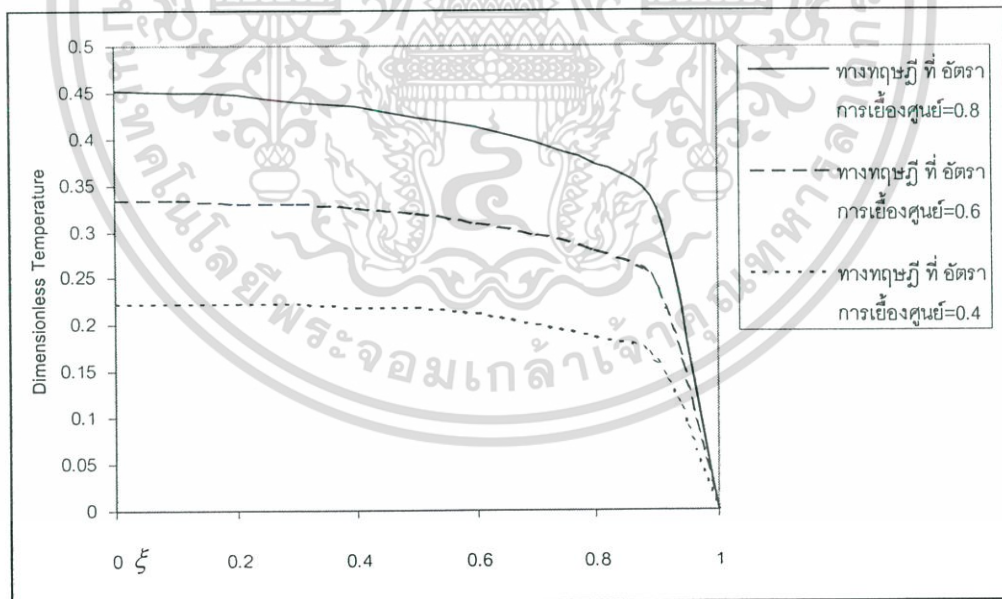


รูปที่ 6.11 แสดงพฤติกรรมของการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันรูป ไร้มิติเทียบกับแกน ξ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

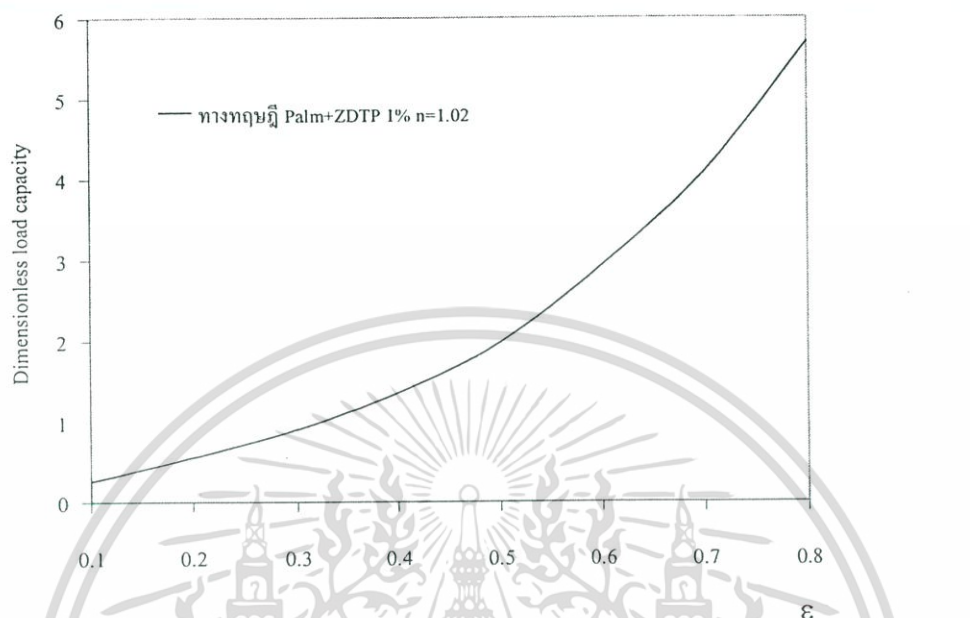


รูปที่ 6.12 แสดงพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันรูปไร้มิติเทียบกับแกน θ

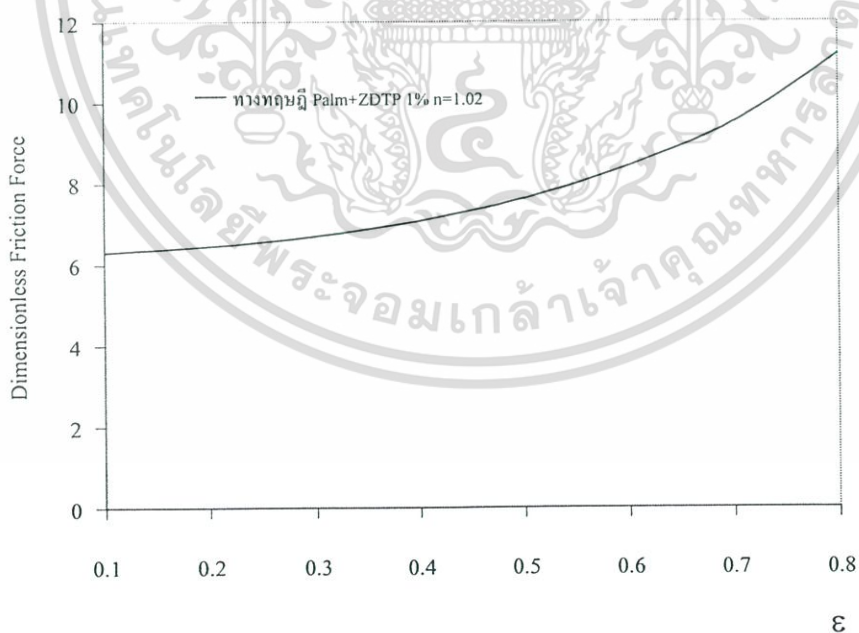


รูปที่ 6.13 แสดงพฤติกรรมของการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันรูปไร้มิติเทียบกับแกน ξ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

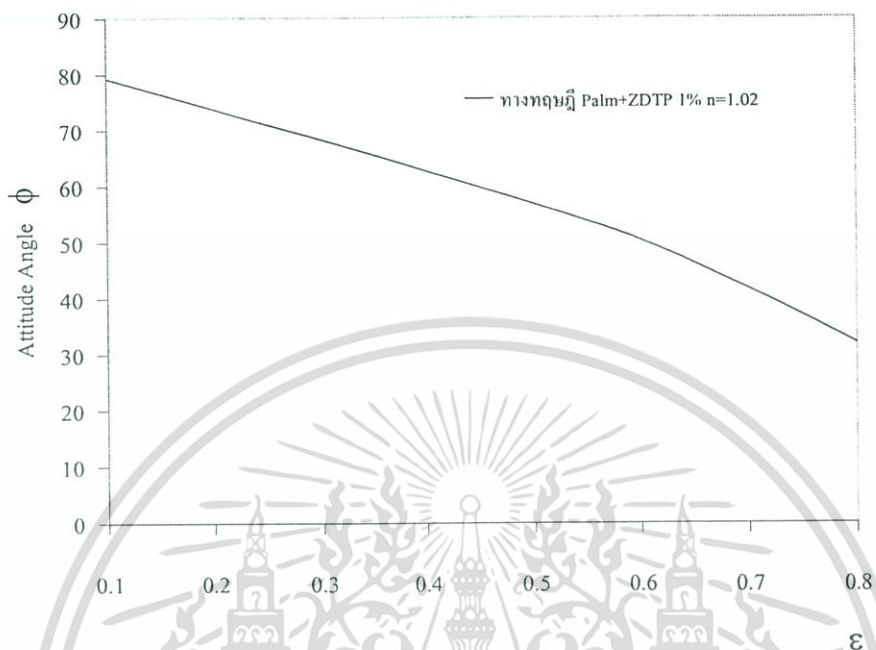


รูปที่ 6.14 แสดงพฤติกรรมการณ์เพิ่มขึ้นของภาระที่กระทำกับเบรจรูปไว้มิติเทียบกับแกน ϵ



รูปที่ 6.15 แสดงพฤติกรรมการณ์เกิดแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นรูปไว้มิติเทียบกับแกน ϵ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

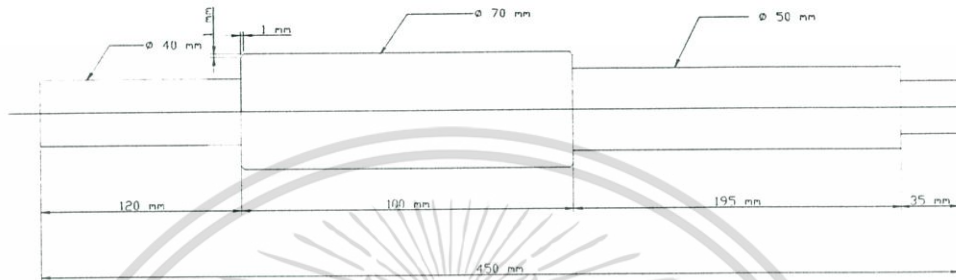


รูปที่ 6.16 แสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงมุมแอตติจูดเทียบกับแกน ϵ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 เฟลากลม (Journal)

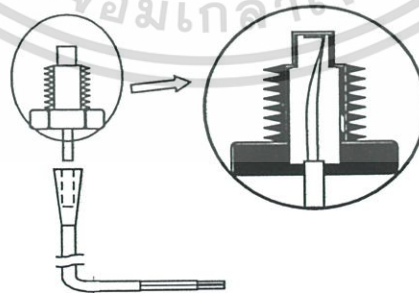
เฟลากลมที่ใช้เป็นจอร์นัลในการทดลองนี้ ทำมาจากเหล็กเฟลากลมแล้วเอามากิ่ง จากนั้นจึงทำการเจียรนัยผิวในช่วงที่ใช้งานให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 70 มิลลิเมตร มีความยาวที่ใช้งาน 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 7.2 แสดงลักษณะของเฟลากลม

7.3 อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure Transducer)

Pressure Transducer เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจาก Strain Gage โดยนำเอา Strain Gage ติดไว้บนแผ่นสแตนเลสบางๆ แล้วจึงนำเอาแผ่นสแตนเลสไปติดไว้ที่ปลายท่อที่ทำจากท่อสแตนเลสโดยให้ตัว Strain Gage อยู่ด้านในของท่อเพื่อไม่ให้ตัว Strain Gage รับโหลด หรือ ความดันโดยตรง ซึ่งในการนำ Pressure Transducer ไปใช้งานนั้นเมื่อเราทำการใส่โหลดหรือ ความดันให้กับแผ่นสแตนเลสที่ติด Strain Gage แล้วจะทำให้ เส้นโลหะเล็กๆภายในตัว Strain Gage เกิดการยืดตัวออก ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานของ Strain Gage เกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยดังนั้นเราจึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างโหลด หรือ ความดันที่กระทำต่อ Strain Gage กับค่าสเตรน (Strain Value) ได้

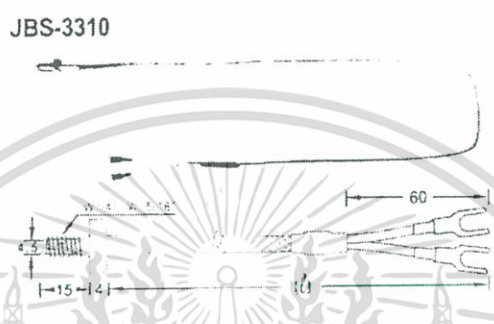


รูปที่ 7.3 แสดงอุปกรณ์ Pressure Transducer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

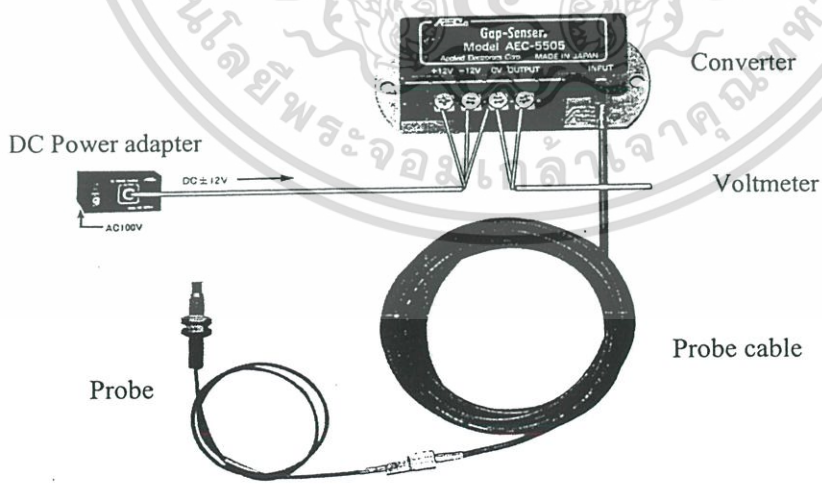
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับวัดอุณหภูมิจะประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิดนำมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกัน ซึ่งจะเป็นจุดที่นำไปใช้วัดอุณหภูมิ (Hot Junction) และปลายอีกด้านเป็นจุดที่ใช้สำหรับอ้างอิง (Cold Junction) เมื่อจุดเชื่อมนี้ได้รับความร้อนก็จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของความร้อนขึ้นซึ่งขนาดและขั้วของแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิแตกต่างที่ปลายทั้งสองและขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาต่อเชื่อมกันด้วย



รูปที่ 7.4 แสดงอุปกรณ์ Thermocouple

7.5 อุปกรณ์วัดความหนาของฟิล์มน้ำมัน (Gap Sensor)

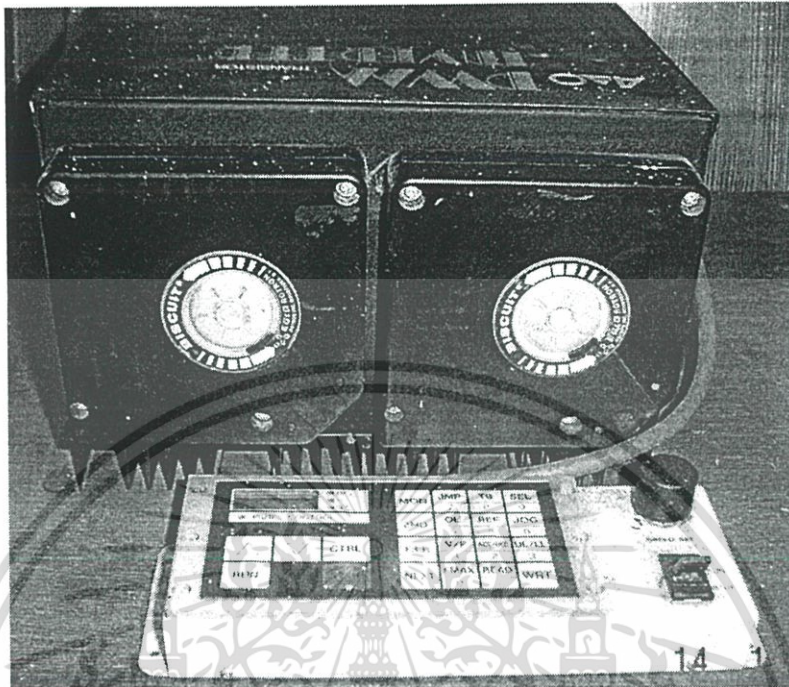
อุปกรณ์ที่ใช้วัดความหนาของฟิล์มน้ำมัน หรือระยะห่างระหว่างเพลตกลมกับกาบรองคลื่น ในการทดลองนี้ได้แก่ Gap Sensor ยี่ห้อ AEC รุ่น AEC 5505 สามารถใช้วัดในช่วง 0-0.2 มิลลิเมตร ใช้กับแหล่งจ่ายไฟขนาด 12 โวลต์ (DC) 40 มิลลิแอมป์ (mA) มีลักษณะและส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 แสดงอุปกรณ์วัดความหนาของฟิล์มน้ำมัน Gap Sensor

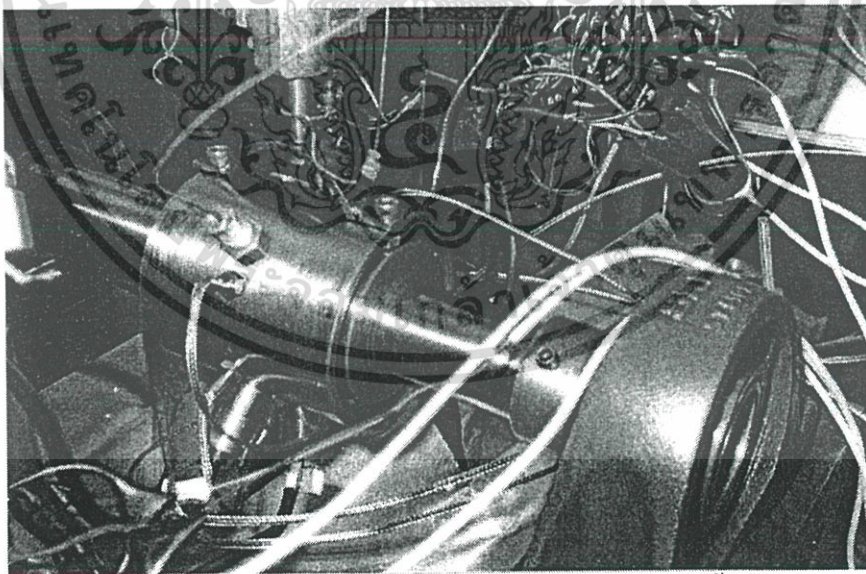
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.6 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์



รูปที่ 7.6 แสดงอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์

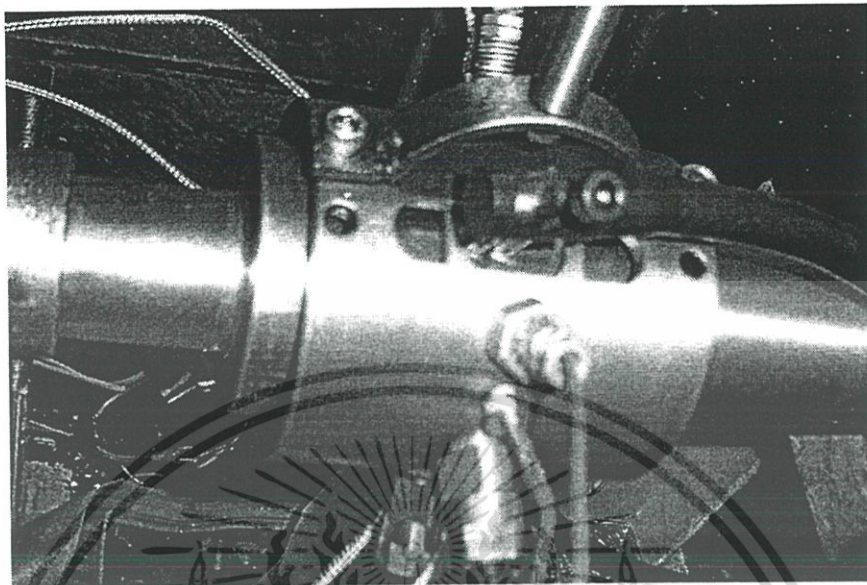
7.7 การประกอบภาครองเดินเข้ากับเพลาลงและติดตั้งอุปกรณ์วัด



รูปที่ 7.7 แสดงการประกอบภาครองเดินเข้ากับเพลาลงและติดตั้งอุปกรณ์วัด

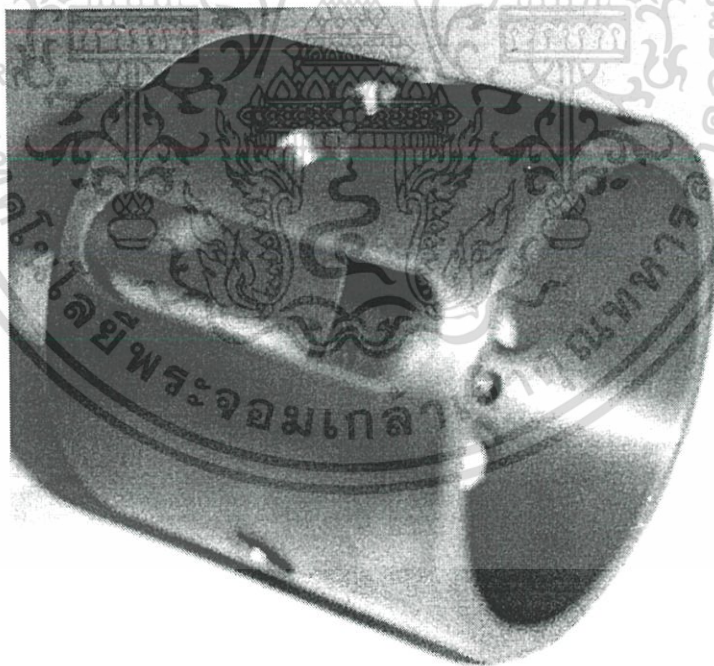
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.8 การปล่อยน้ำมันหล่อลื่นเข้ากาบรองลื่น



รูปที่ 7.8 แสดงการปล่อยน้ำมันหล่อลื่นเข้ากาบรองลื่น

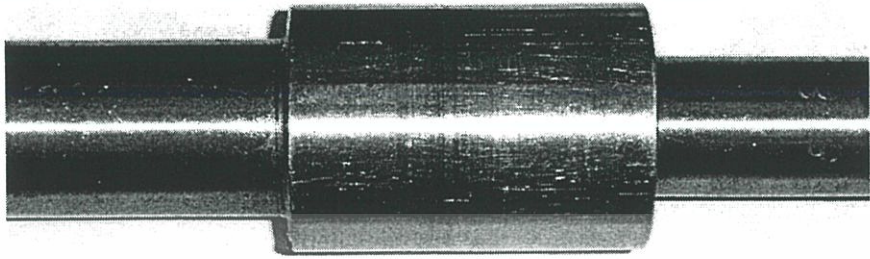
7.9 ลักษณะของกาบรองลื่น



รูปที่ 7.9 แสดงลักษณะของกาบรองลื่น

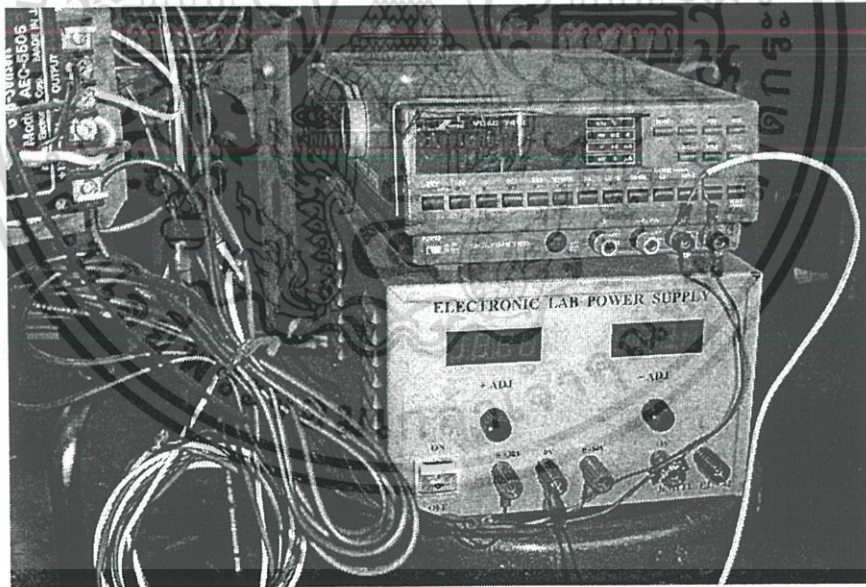
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.10 ลักษณะของเพลากลม



รูปที่ 7.10 แสดงลักษณะของเพลากลม

7.11 เครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า



รูปที่ 7.11 แสดงเครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้าของ Pressure transducer , Thermocouple และ Gap sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

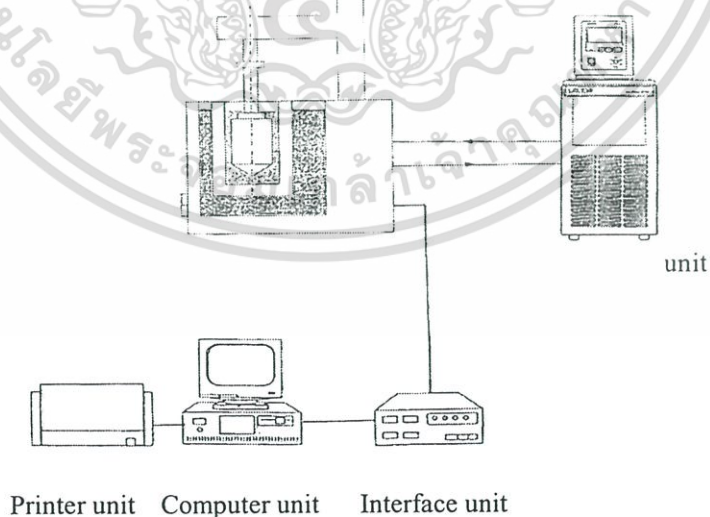
วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่ ขั้นตอนการทดลองทางรีโอโลยี ขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการวัด และขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองหาพฤติกรรมการหล่อลื่น

8.1 ขั้นตอนการทดลองทางรีโอโลยี (Rheology Lab Test)

การทดลองทางรีโอโลยีเพื่อหาเส้นกราฟแสดงการไหล (Flow Curve) หรือเป็นการหาความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) และค่าอัตราเฉือน (Shear Rate) ของน้ำมันทดสอบโดยน้ำมันพืชที่ใช้ในการทดลอง

น้ำมันปลาล้มผสมสาร ZDTP 1%



รูปที่ 8.1 แสดงผังโคอะแกรมของอุปกรณ์ Rheology lab test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2 ขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

8.2.1 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

อุปกรณ์สำหรับวัดความดันของฟิล์มน้ำมันที่ใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้คือ Pressure Transducer ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาจาก Strain Gage ในการสอบเทียบค่าของอุปกรณ์ Pressure Transducer เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเตรน (Strain Value) กับค่าความดันนี้ ได้ทำการติดตั้งหัว Prob ของ Pressure Transducer เข้ากับเครื่อง Dead Weight Tester แล้วต่อปลายสายของ Pressure Transducer เข้ากับ Power Supply และ Multimeter เพื่ออ่านค่า ดังแสดงในรูปที่ 8.2 จากนั้นจึงทำการใส่ก้อนน้ำหนักที่มีขนาดเทียบเท่ากับความดัน 0.5 kg/cm^2 ลงบน Dead weight tester แล้วจึงทำการบันทึกค่าที่อ่านได้จาก Multimeter แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟระหว่างค่า สเตรน (Strain Value) กับค่าความดัน

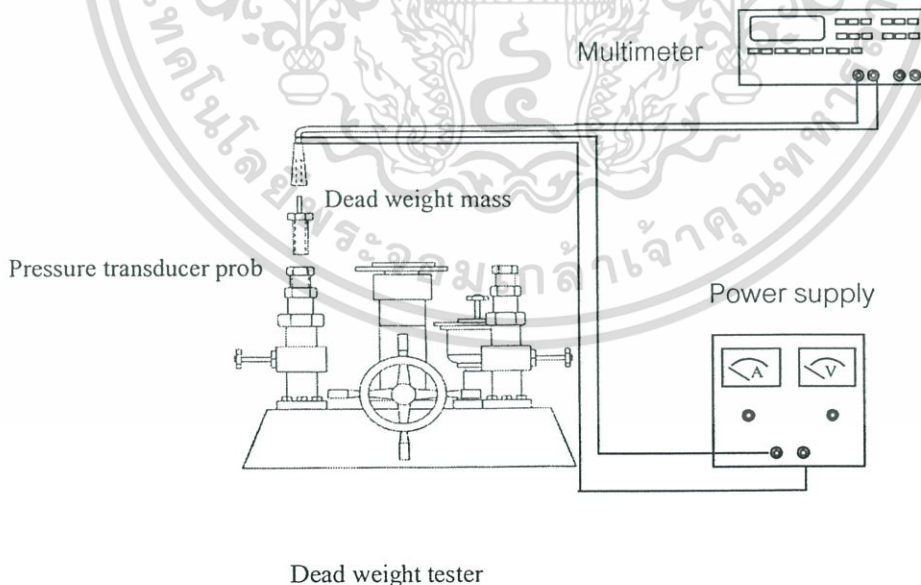
รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดความดันได้แสดงในรูปที่ 8.2 ซึ่งจะประกอบด้วย

8.2.1.1 Dead Weight tester

8.2.1.2 Dead Weight mass

8.2.1.3 Multimeter

8.2.1.4 Power Supply



รูปที่ 8.2 แสดงอุปกรณ์การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

8.2.2 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน (Thermocouple)

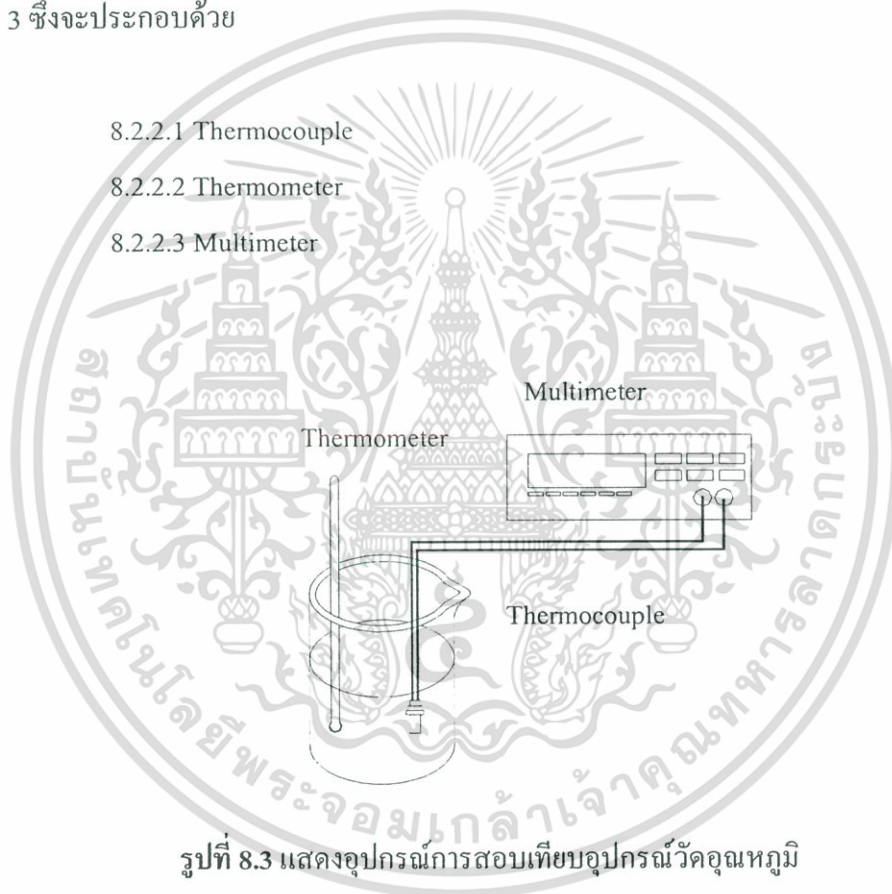
เครื่องมือสำหรับวัดอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมัน ในการสอบเทียบค่าของอุปกรณ์ Thermocouple จะทำการสอบเทียบที่อุณหภูมิต่าง ๆ กับ Thermometer โดยบันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่อง Voltmeter แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง Voltage กับ อุณหภูมิที่อ่านได้จาก Thermometer ดังรูปที่ 8.3

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิของฟิล์มน้ำมันได้แสดงในรูปที่ 8.3 ซึ่งจะประกอบด้วย

8.2.2.1 Thermocouple

8.2.2.2 Thermometer

8.2.2.3 Multimeter

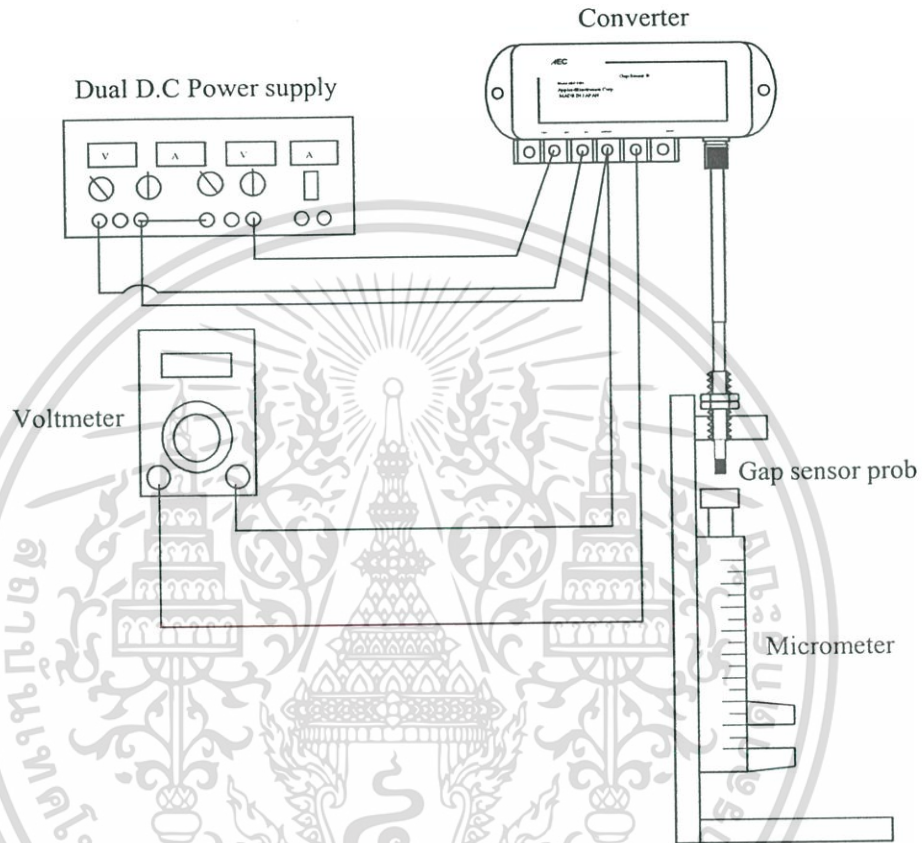


รูปที่ 8.3 แสดงอุปกรณ์การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

8.2.3 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความหนาของฟิล์มน้ำมัน (Gap Sensor)

เครื่องมือสำหรับวัดความหนาของฟิล์มน้ำมันที่อยู่ระหว่างกาบรองลื่นกับเพลากลมที่ใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้คือ Gab Sensor ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดระยะการขจัดโดยไม่ต้องมีการสัมผัสของหัวโพรบ (Prob) กับพื้นผิววัตถุเป้าหมาย (target object) ในการสอบเทียบค่าของอุปกรณ์ Gab Sensor นี้ จะทำการติดตั้งหัว Probe เข้ากับตัวยึดเพื่อไม่ให้หัวโพรบเกิดการเคลื่อนที่ในระหว่างการ

สอบเทียบค่า ดังแสดงในรูปที่ 8.4 โดยให้หัวโพรบอยู่บนผิววัตถุเป้าหมาย จากนั้นจึงทำการเลื่อนวัตถุเป้าหมายให้เคลื่อนที่ไปแล้วจึงทำการบันทึกค่าที่อ่านได้โดยการอ่านจากเครื่องโวลต์มิเตอร์ (Voltmeter) แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง Voltage กับ ระยะขจัด (Displacement)



รูปที่ 8.4 แสดงการสอบเทียบค่าของอุปกรณ์วัดความหนาฟิล์มน้ำมัน

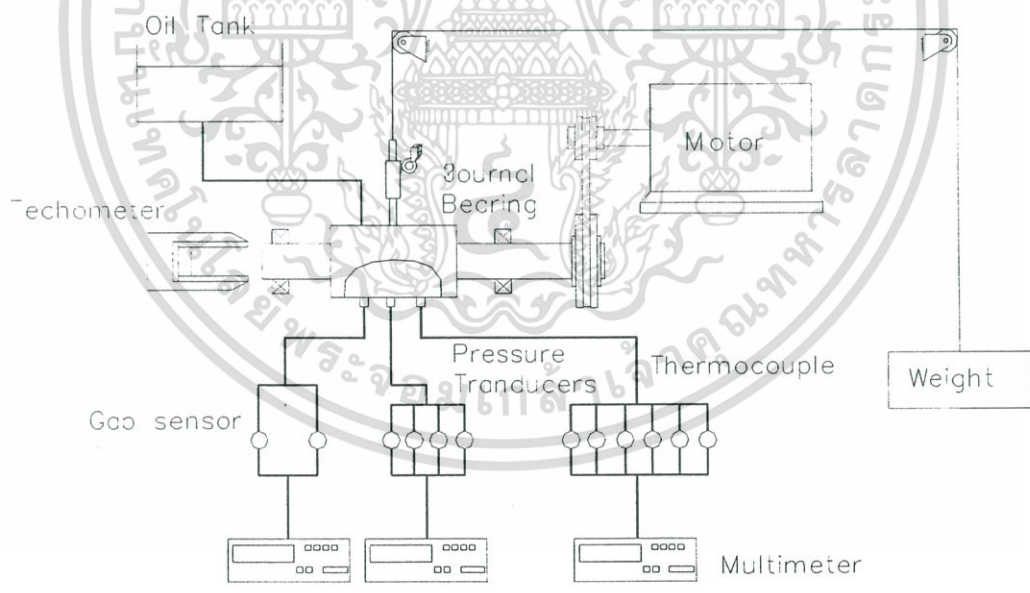
8.3 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองหาพฤติกรรมการหล่อลื่น

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองหาพฤติกรรมสถิตซ์ของการหล่อลื่นด้วยน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1% โดยน้ำหนัก ในกาบรองลื่นเพลากลมแบบเต็มวงภายใต้สภาวะคงตัว ในห้อง Lubrication Laboratory ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กาบรองลื่นเพลากลม (Journal Bearing) ที่ใช้ในการทดลองมีค่าอัตราส่วนของ $c/r = 0.00285$ ในการทดลองได้ทดลองที่ค่าเฉลี่ยเลนที่ 0.1 mm . แต่ละอัตราส่วน $D/L=1$ ทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ภายใต้อัตราการเชิงศูนย์กลาง 3 ค่า คือที่ 0.2 , 0.4 และ 0.6 โดยที่แต่ละค่าอัตราการเชิงศูนย์กลาง จะแบ่งการทดสอบที่ความเร็วรอบ 3 ค่า คือที่ค่าความเร็วรอบเท่ากับ 400 , 600 และ 800 รอบ/นาที โดยในการทดสอบในแต่ละสภาวะได้กระทำที่สภาวะคงตัว (Steady State) และได้ทดสอบในสภาพการทำงานภายใต้อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วงประมาณ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งมี วิธีการทดลองดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งอุปกรณ์ตามที่แสดงในรูปที่ 8.5
2. เติมน้ำมันพืชทดสอบที่ผสมสารเพิ่มคุณภาพแล้วลงในถังจ่ายน้ำมัน (Oil Tank)
3. ใส่น้ำหนักหรือภาระโดยการแขวนก้อนน้ำหนักให้ได้อัตราการเชิงศูนย์กลางเท่ากับ 0.2 , 0.4 และ 0.6
4. เปิดวาล์วให้น้ำมันไหลจากถังจ่ายน้ำมัน ไปยังหัวจ่ายน้ำมัน
5. เปิดสวิทช์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ แล้วปรับปุ่มควบคุมความเร็วของตัว Inverter ให้หมุนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 400 , 600 และ 800 รอบ/นาที โดยอ่านจาก Techometer
6. รอจนกระทั่งค่าระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) แล้วจึงทำการจดบันทึกค่า
7. นำผลที่ได้จากการทดลองไปพล็อตกราฟ



รูปที่ 8.5 แสดงผังไดอะแกรมของการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

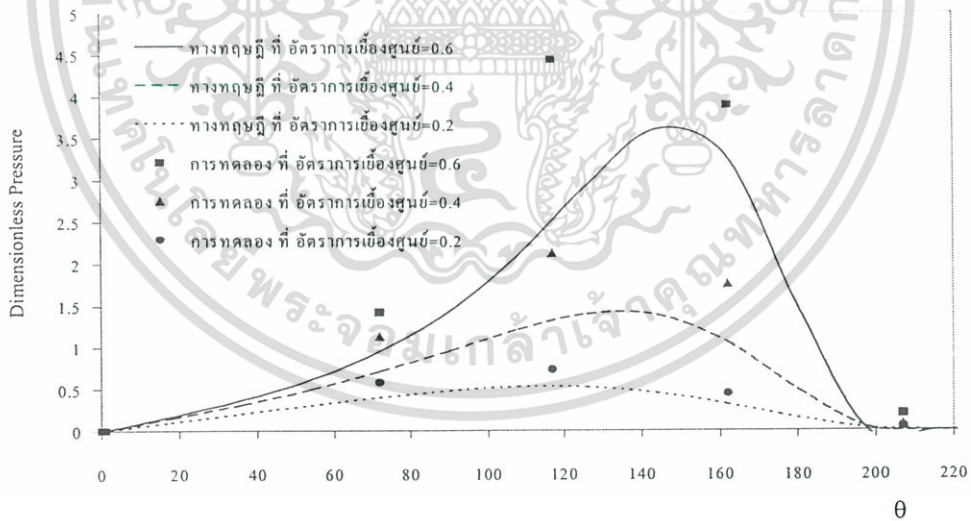
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี

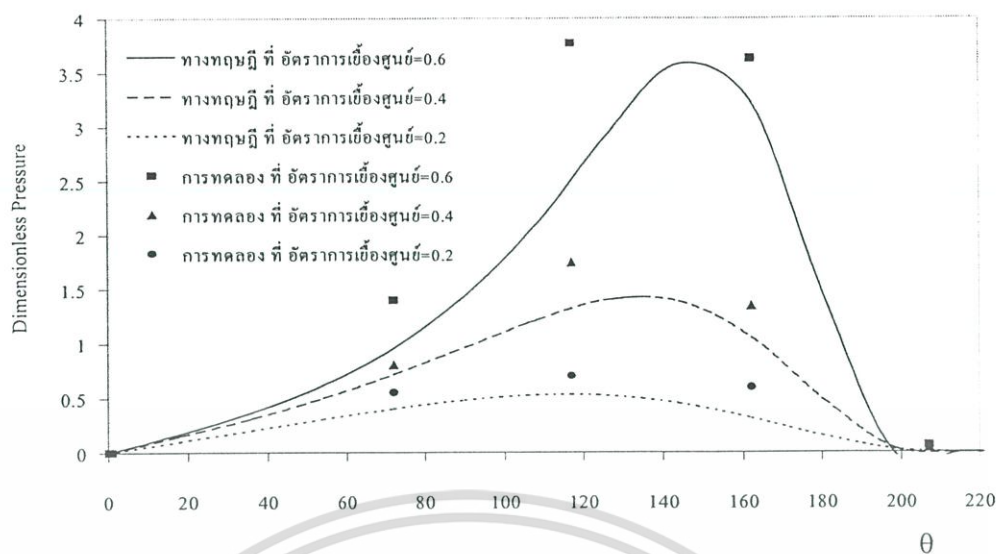
การศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของกาบรองลื่นเพลากลมแบบเต็มวง ที่หล่อลื่นด้วยน้ำมันพืช โดยน้ำมันพืชที่ใช้ในการทดสอบคือน้ำมันปาล์ม โดยเติมสารเพิ่มคุณภาพประเภท ไดอัลโคลน ไดไตรโอพอสเฟสเท่ากับ 1% โดยน้ำหนัก เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันปาล์มเกิดการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศ ในการทดลองหาพฤติกรรมการหล่อลื่นได้ใช้กาบรองลื่นเพลากลมแบบเต็มวง ซึ่งขณะที่เพลามุนด้วยความเร็วคงที่บนฟิล์มน้ำมันซึ่งถูกรองรับด้วยกาบรองลื่นจะมีความดันเกิดขึ้น ซึ่งลักษณะความดันที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อพฤติกรรมการหล่อลื่น ปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่มีผลต่อลักษณะพฤติกรรมของความดันและอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันมีดังนี้

1. ความเร็วของเพลามีผลต่อพฤติกรรมการหล่อลื่น
2. อัตราการเชิงศูนย์กลางของเพลามีผลต่อพฤติกรรมการหล่อลื่น
3. พฤติกรรมกระจายแรงดันและการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในฟิล์มน้ำมัน

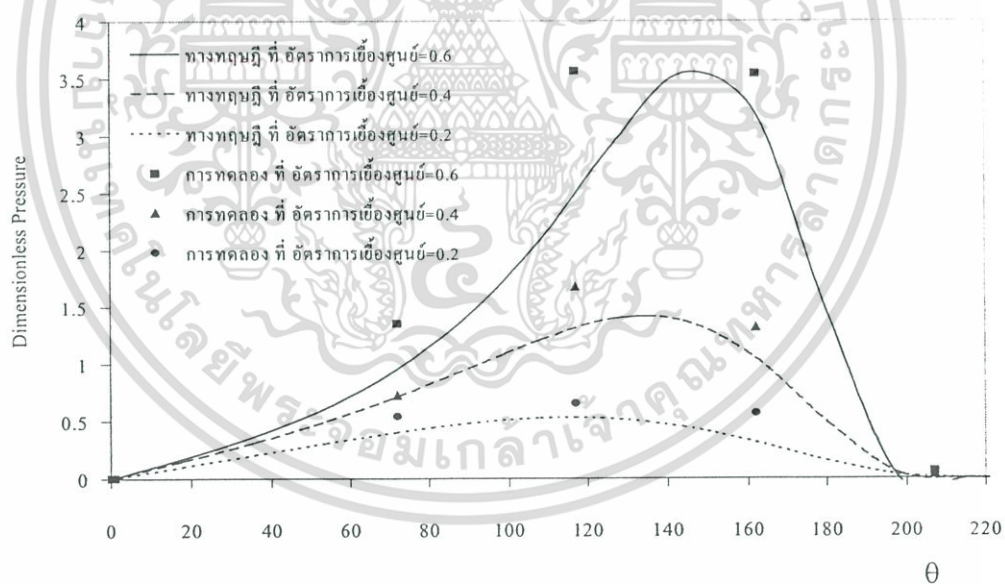
9.1 พฤติกรรมกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมัน



รูปที่ 9.1 แสดงการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันจากการคำนวณทางทฤษฎีตามแนวเส้นรอบวง เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 400 rpm.



รูปที่ 9.2 แสดงการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันจากการคำนวณทางทฤษฎีตามแนวเส้นรอบวง
เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 600 rpm.



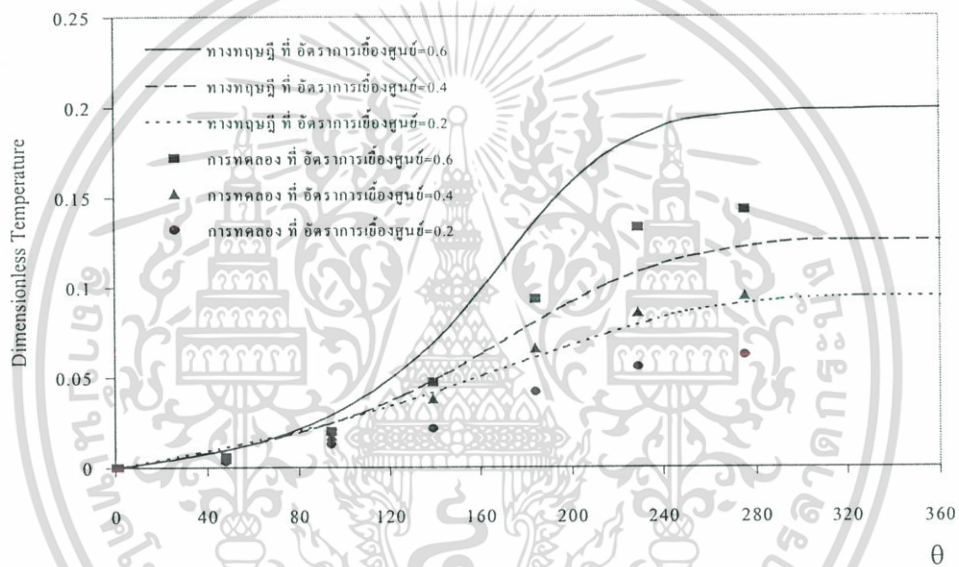
รูปที่ 9.3 แสดงการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันจากการคำนวณทางทฤษฎีตามแนวเส้นรอบวง
เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 800 rpm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

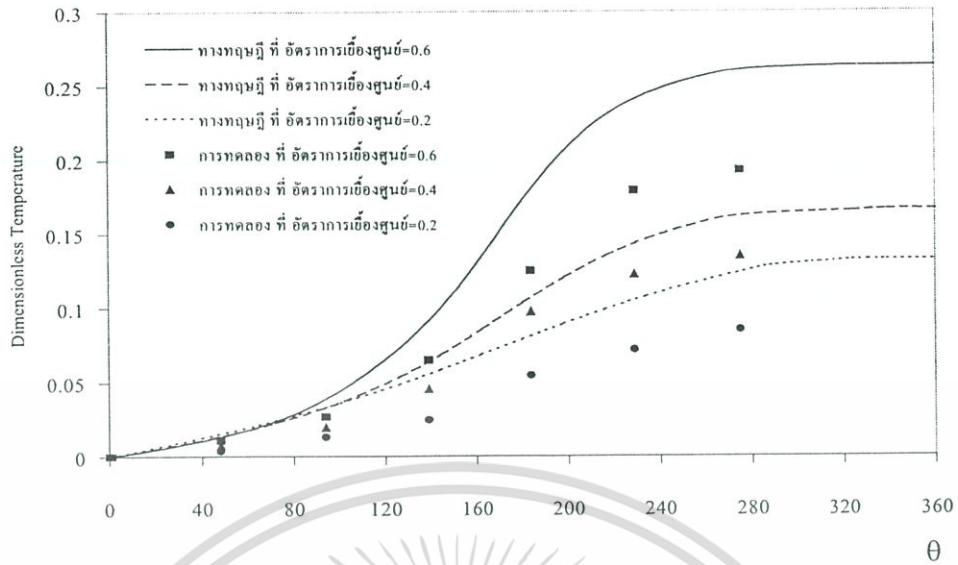
ในรูปที่ 9.1 – 9.3 แสดงให้เห็นพฤติกรรมการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรอลิ้นที่มีผลต่อค่าการกระจายแรงดัน พบว่าที่อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง 0.6 จะมีค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าที่ อัตราการเยื้องศูนย์กลาง 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ

ในรูปที่ 9.1 – 9.3 ยังได้แสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบมีผลต่อพฤติกรรมการกระจายแรงดัน พบว่าที่ความเร็วรอบ 800 จะมีค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นน้อยกว่าที่ความเร็วรอบ 600 และ 400 rpm. ตามลำดับ

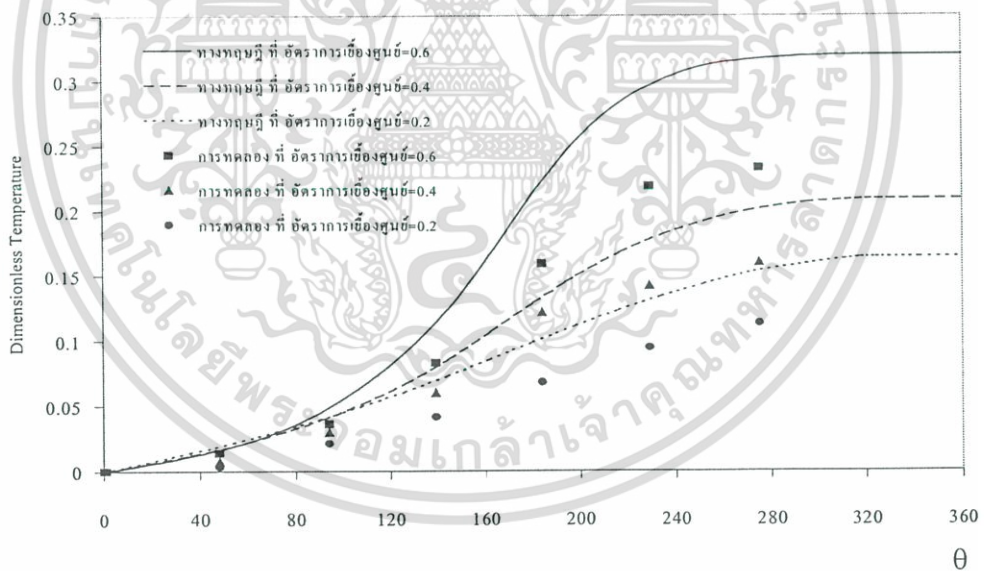
9.2 พฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมัน



รูปที่ 9.4 แสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันจากการคำนวณทางทฤษฎีตามแนวเส้นรอบวงเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 400 rpm.



รูปที่ 9.5 แสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันจากการคำนวณทางทฤษฎีตามแนวเส้นรอบวง
เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 600 rpm.



รูปที่ 9.6 แสดงการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันจากการคำนวณทางทฤษฎีตามแนวเส้นรอบวง
เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่ความเร็วรอบ 800 rpm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 9.4 – 9.6 แสดงให้เห็นพฤติกรรมการเยื้องศูนย์กลางของเพลากับการรูดิ้นที่มีผลต่อค่าการกระจายอุณหภูมิ พบว่าที่ อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง 0.6 จะมีค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าที่ อัตราการเยื้องศูนย์กลาง 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ

ในรูปที่ 9.4 – 9.6 ยังได้แสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบมีผลต่อพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิ พบว่าที่ความเร็วรอบ 800 จะมีค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นมากกว่าที่ความเร็วรอบ 600 และ 400 rpm. ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

10.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบโดยวิธีออฟติไมซ์เซชันสำหรับแบร็งเพลากลมหล่อลื่นด้วยน้ำมันปาล์มผสม ZDTP 1% โดยน้ำหนัก ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนของสารหล่อลื่นได้จากการทดลอง สมการเรย์โนลด์และสมการพลังงานถูกประยุกต์ภายใต้ทฤษฎีเพาเวอร์ลอว์ คำนวณสมการประยุกต์ที่ได้เชิงตัวเลขเพื่อหาพฤติกรรมการหล่อลื่นในแบร็งเพลากลม ทำให้ได้การกระจายแรงดันและการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมัน การออกแบบแบร็งเพลากลมโดยวิธีออฟติไมซ์เซชันใช้ข้อมูลที่ได้จากการกระจายแรงดันเพื่อคำนวณอัตราการไหล และการกระจายอุณหภูมิเพื่อหาผลต่างอุณหภูมิ กำหนดสมการวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนเคียร์เรนซ์ต่อรัศมีของเพลลา และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลาต่อความยาวแบร็งที่เหมาะสมได้ค่า $\frac{c}{r} = 0.00285$ และ $\frac{D}{L} = 1$ คำนวณสมการวัตถุประสงค์ร่วมกับสมการเงื่อนไขบังคับ $0.001 < \frac{c}{r} < 0.005$ และ $0.5 < \frac{D}{L} < 4$ ด้วยโปรแกรมเอ็กซ์ซอสทีปเสริช ร่วมกับวิธีอินดิเร็กเสริช ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาวิธีอินดิเร็กเสริชด้วยกัน 3 วิธี โดยวิธี บรอยเดน-เฟลตเซอร์-โกลด์เฟบ-ชันโน (BFGS) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด และถูกใช้ในการคำนวณในการออกแบบหาขนาดที่เหมาะสมของแบร็งเพลากลมหล่อลื่นด้วยน้ำมันปาล์มในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อย่างไรก็ตามวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็ยังได้นำเอาวิธี คาวิดอน-เฟลตเซอร์-พาวเวล (DFP) มาใช้คำนวณร่วมกับวิธีเอ็กซ์ซอสทีปเสริช ด้วยอีกทางหนึ่ง จุดประสงค์เพื่อตรวจสอบค่าที่คำนวณได้จากวิธี วิธี บรอยเดน-เฟลตเซอร์-โกลด์เฟบ-ชันโน ปรากฏว่าผลการคำนวณจากสองวิธีได้ค่าเท่ากัน

จากนั้นได้นำขนาดของแบร็งที่เหมาะสมที่คำนวณได้เป็นขนาดแบร็งในการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข การศึกษา ออกแบบ และทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การออกแบบหาขนาดที่เหมาะสมของแบร็งเพลากลมโดยวิธีแอสซอสทีปเสริชร่วมกับวิธีบรอยเดน-เฟลตเซอร์-โกลด์เฟบ-ชันโน สามารถคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบร็งเพลากลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. เปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากวิธีแอสซอสทีฟเสริชร่วมกับวิธีบรอยเดน-เฟรชเซอร์-โกลด์เฟบ-ชันโน กับ วิธีแอสซอสทีฟเสริชร่วมกับวิธีดาวิดอน-เฟรชเซอร์-พาวเวล พบว่าทั้งสองวิธีสามารถคำนวณได้ขนาดที่เหมาะสมของแบร็งเพลากลมเท่ากัน
3. จากการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของแบร็งเพลากลม พบว่าที่ภายใต้ความเร็วรอบคงที่ เมื่อเพิ่มภาระที่มากขึ้น ทำให้เกิดการเอียงศูนย์กลางของเพลากับการรอลื่นจะส่งผลให้ค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันมีค่ามากขึ้น และค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันมีค่าสูงขึ้น
4. จากการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของแบร็งเพลากลม พบว่าที่ภายใต้ภาระคงที่ เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของเพลาก็จะมีผลทำให้ค่าการกระจายแรงดันในฟิล์มน้ำมันมีค่าลดลง แต่ค่าการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันมีค่าสูงขึ้น
5. จากการเปรียบเทียบค่าการกระจายแรงดัน และการกระจายอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันของแบร็งเพลากลม พบว่าค่าการกระจายแรงดันและการกระจายอุณหภูมิที่ได้จากทดลองและการคำนวณสอดคล้องกัน
6. การออกแบบหาขนาดที่เหมาะสมของแบร็งเพลากลมหล่อลื่นด้วยน้ำมันปาล์มก่อให้เกิดประโยชน์และมีประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุด

10.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการทดสอบระบบเพลลา และการรอลื่นสำหรับใช้งานจริงเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่เพื่อดูอายุการใช้งานและการเสื่อมสภาพของน้ำมันพืช
2. ผลการทดลองที่ได้พบว่าแนวโน้มของพฤติกรรมมีลักษณะที่สอดคล้องกับการคำนวณ แต่เนื่องจากในทางทฤษฎีมีข้อสมมุติฐานว่าเป็น Adiabatic แต่ในทางปฏิบัติเป็น non-Adiabatic ดังนั้นจึงมีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลทางทฤษฎีและผลการทดลอง รวมทั้งความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด
3. ในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้ศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของการผสมสารเพิ่มคุณภาพที่ผสมลงในน้ำมันพืชที่นำมาใช้ทดสอบ และไม่ได้ทำการศึกษาถึงผลของการสึกหรอและการกัดกร่อนของน้ำมันพืชที่มีต่อวัสดุที่นำมาใช้ทำกาบรอลื่นเพลากลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. M.Mongkolwongrojn, Ch. Aiumpornsin **Static And Dynamic Characteristics Of Journal Bearings with Non-Newtonian Palm-Based Oils**, Int. J. of Applied Mechanics and Engineering, Vol.8 pp79-86, 2003.
2. Mongkolwongrojn, M., Arunmetta,P. 2000. **Theoretical Characteristic of Hydrodynamic Journal Bearing Lubricated with Soybean-based Oil** , 9th Nordic Symposium on Tribology : at Porvoo, Finland, 11-14 June
3. Hashimoto H., Mongkolwongrojn M. 1993. **Advanced lubrication theory**. KMITL, Bangkok.
4. Jiin-Yuh Jang and Chong-Ching Chang **Adiabatic Analysis of Finite Width Journal Bearings with Non-newtonian Lubricants**, Wear., Vol. 122 pp.63-75, 1988.
5. Hsu Y.C. **Non-newtonian Flow in Infinite Length Full Journal Bearing**, ASME Trans., Journal of Lubrication Technology , pp. 329-333, 1967.
6. Reynolds, O. 1886 **On the Theory of Lubrication and its Application to Mr. Beachamp Tower's Experiments**. Phil. Trans. Roy. Soc., 177 , 1886.
7. Horowitz, H.H, and Steidler, F.E. 1961. **Calculated performance of Non-Newtonian Lubricants in Finite Width Journal Bearing** . ASLE Trans. Vol. 4.
8. Tanner, R.I.,1963. **Non-Newtonian Lubrication Theory and Its Application to the Short Journal Bearing** . Australian Journal of Applied Science, vol. 14,
9. Tanner, R.I., 1964. **Short Bearing Solution for Pressure Distribution in a Non-Newtonian Lubrication**. Trans. ASME Journal of Applied Mech.
10. Wada,S.,and Hayashi, H. 1971. **Hydrodynamic Lubrication of Journal Bearing by Pseudoplastic Lubricants**. Bulletin of the JSME
11. Safar, Z.S. 1979. **Journal Bearing Operating with Non-Newtonian Lubricant Films**. WEAR, vol. 53.
12. Ranny, M.W.,1973. **Lubricant Additives**. Noyes Data Co:London.
13. Schey, J.A. 1984. **Tribology in Metalworking : Friction, Lubrication and Wear**, American Society for Metals: Ohio.
14. Freeman,J.P,Padly,F.B and Sheppard, W.L. 1973. **Use of silicones in flying oils**. Jour. Amer. Oil Chem., 50,101.

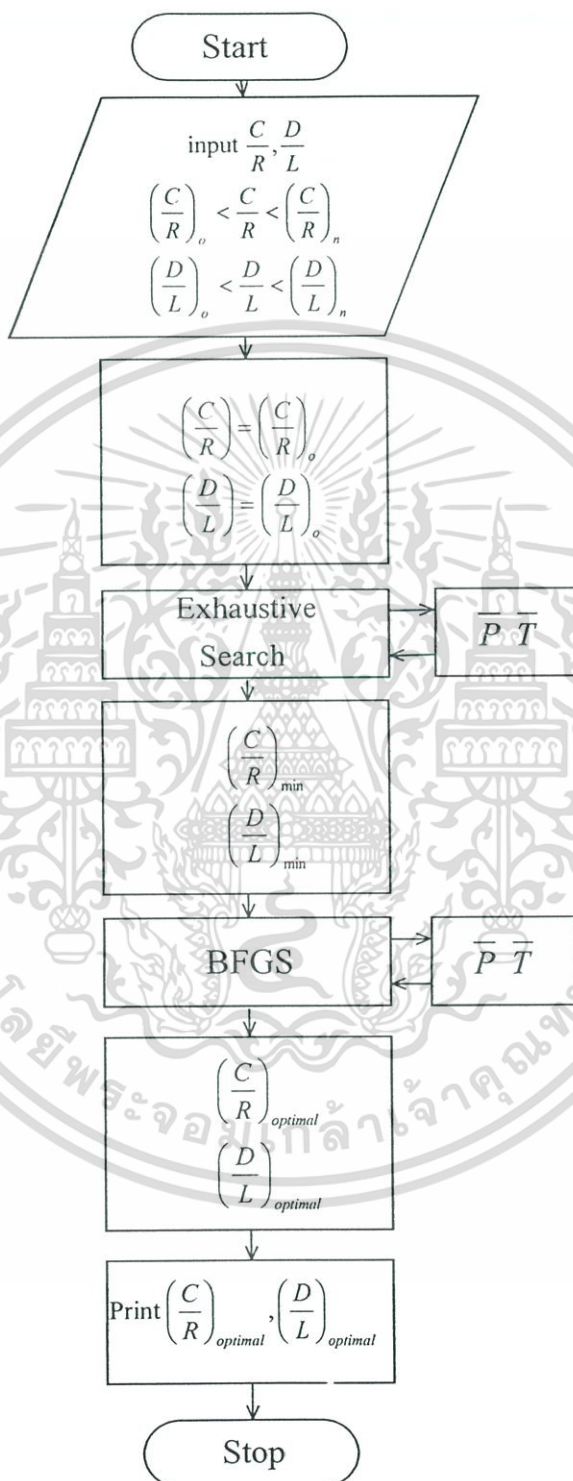
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. W. Khanittha, 2002 **Optimal Design of the Head Slider in Magnetic Storage Devices.**
Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.
16. U. Nujunkaew, 2003 **Thermohydrodynamic Lubrication of Journal Bearing with Vegetable-Based Oil.** Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.
17. Csichos,H., 1978 **Tribology : A system approach to the science and Technology of friction,lubrication and wear.** Elsevier scientific publishing Co:New York.
18. Stachowick,G.W., Batchlor, A.W. 1993. **Engineering Tribology.** Elsevier science publishers: Natherlands.
19. Bielew, C.A.,and Anrovs., **The Lubrication Engineering Manual.** 1thed. U.S.A.: United States steel Co.,197.
20. A.Z. Szeri, 1980. **Tribology : friction,lubrication and wear.** Mc Graw Hill Co:Newyork,
21. V.K.bhatai, Alka Chaudhra, G.A. Sivasankaran,R.P.S. bisht and Meenu kashyap. 1990. **Modification of Jojoba oil for lubricant formulations.** JAOCS,vol.67
22. J.V.fedor. 1963. **Half Sommerfeld appoximation for Finite Journal Bearings.** Transaction of the ASME Journal Basic Engineering.
23. Horowitz, H.H., Steindler F.E., **Calculated Performance of Non-Newtonian Lubricants in Finite Width Journal Bearings,** ASLE Trans., Vol.4, pp.275-281, 1961.
24. I.K. Dien and H. Elrod, **A generalized steady-state Renolds' equation of Non-newtonian fluids, with application to journal bearings,**J.Lubr. Technol., 105(1983) 385-390
25. Sakata,M. Takahasni,Y. and Sonehara,M. 1985. **Quality of flied food with palm oil.** Jour. Amer. Oil Chem. 62,449.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

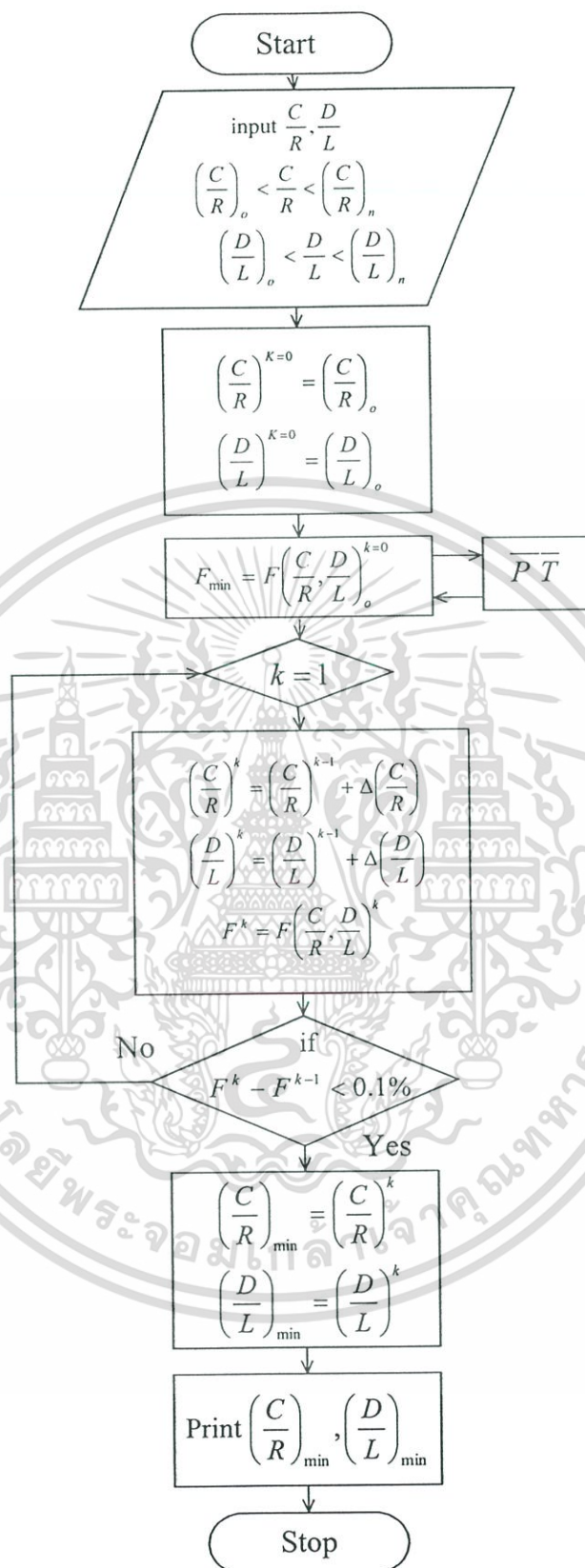
แผนผังลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม (Flowcharts)



รูปที่ ก. 1 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณขนาดที่เหมาะสมที่สุดของเบริ่งเพลลา

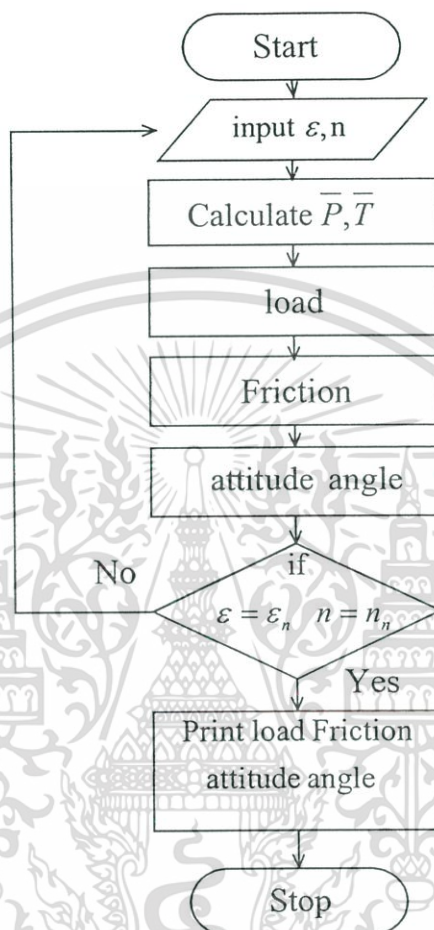
กลม โดยใช้วิธี Exshautive Search ร่วมกับวิธี BFGS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



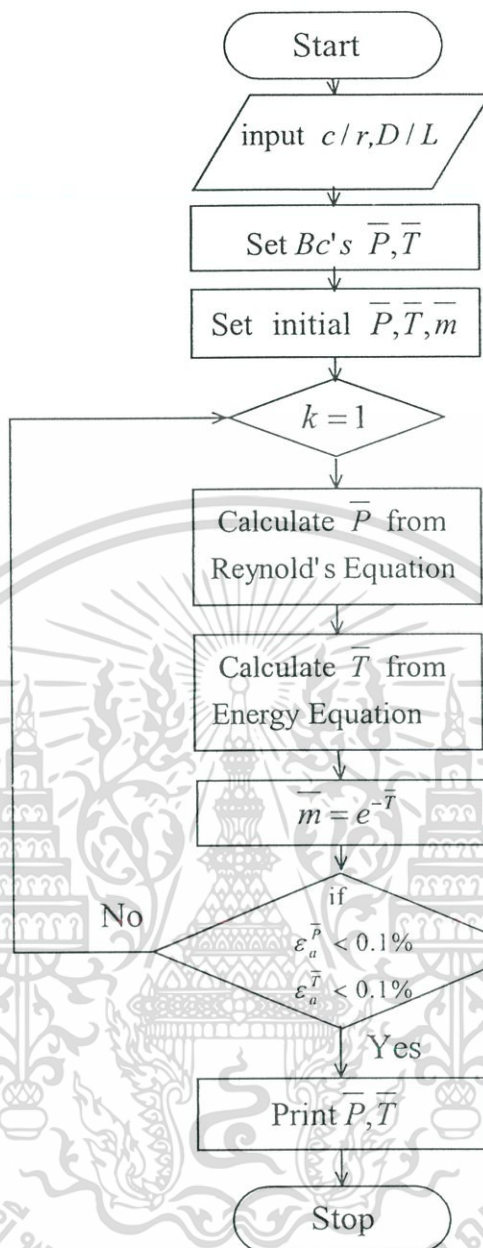
รูปที่ ก. 2 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณขนาดที่เหมาะสมที่สุดของเบร็งเพลากลม โดยใช้
วิธี Exshautive Search

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



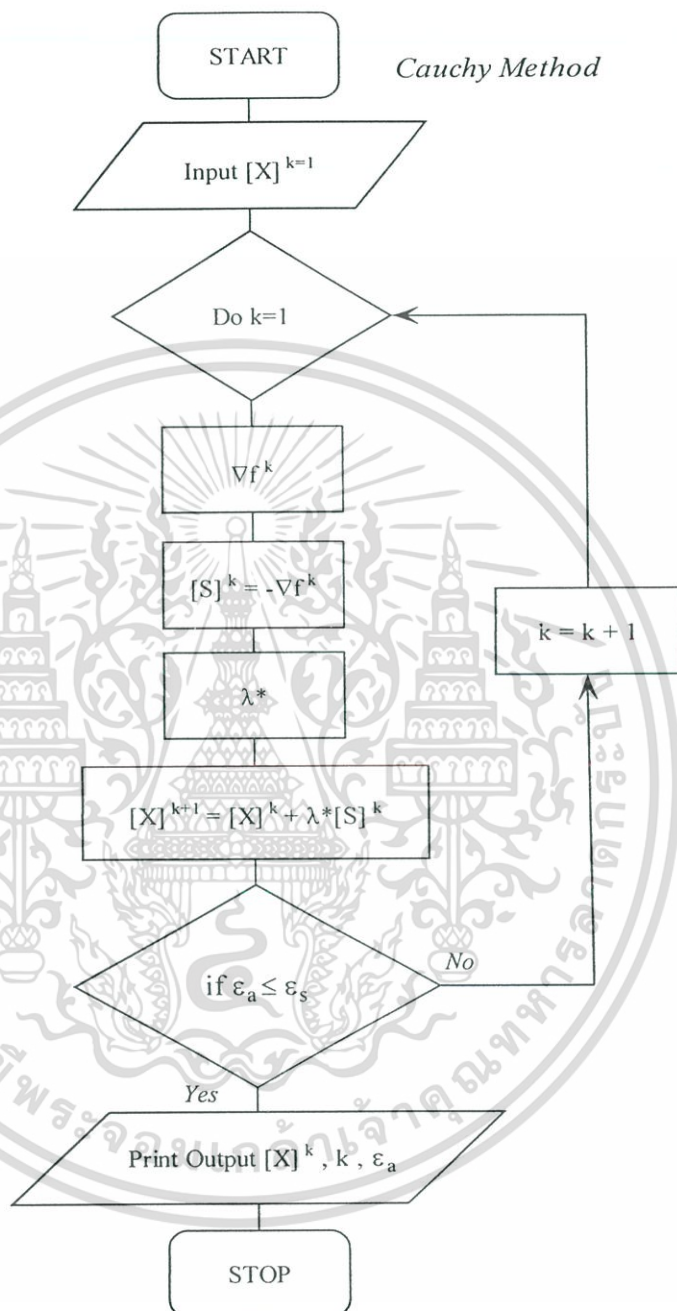
รูปที่ ก. 3 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณหาค่าภาระที่แท้จริงเพลากลสมสามารถรับ แรงเสียดทานและมุมเอติจูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



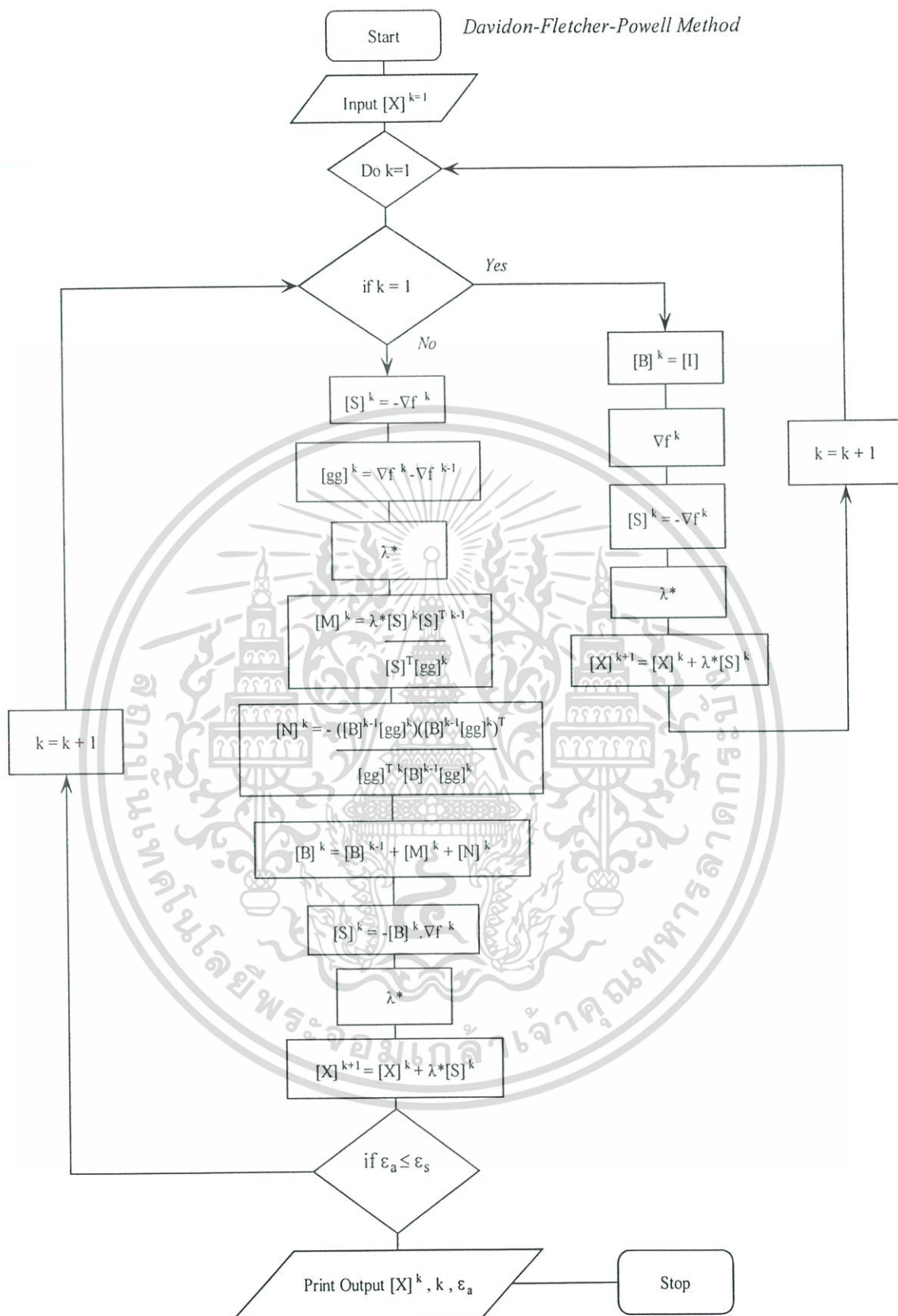
รูปที่ ก. 4 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณหาค่าการกระจายแรงดันและการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในฟิล์มน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



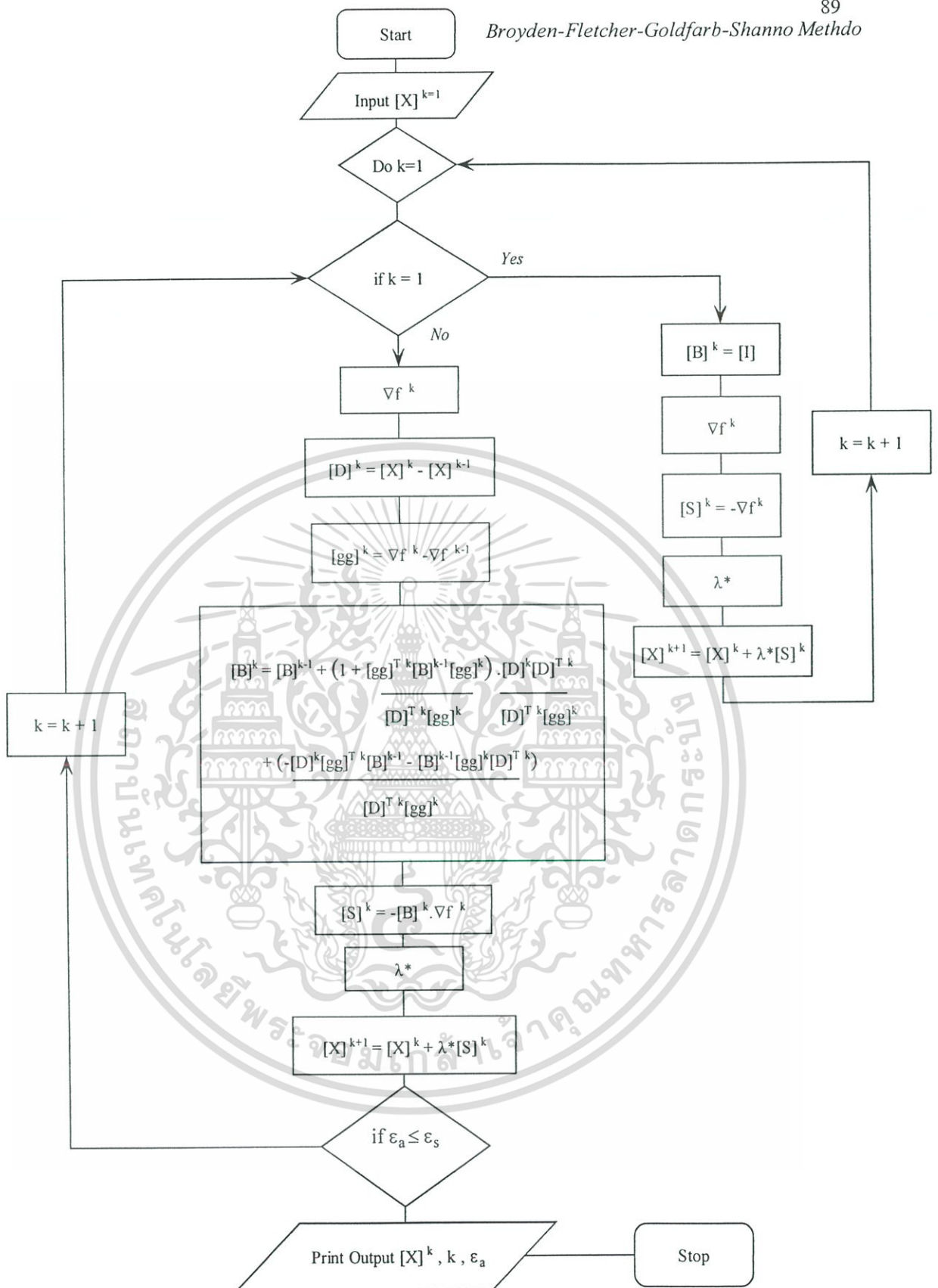
รูปที่ ก. 5 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณหาค่าจุดต่ำสุดด้วยวิธี Cauchy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



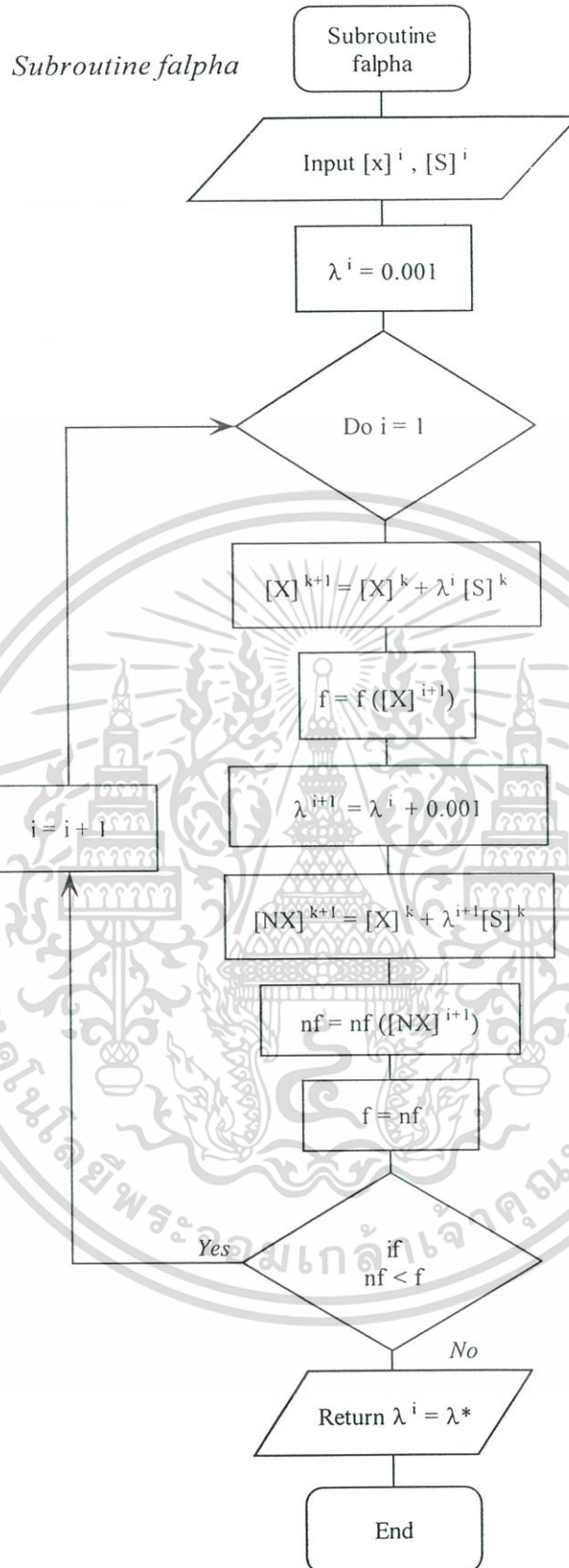
รูปที่ 6. แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณหาค่าจุดต่ำสุดด้วยวิธี DFP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก. 7 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณหาค่าจุดต่ำสุดด้วยวิธี BFGS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

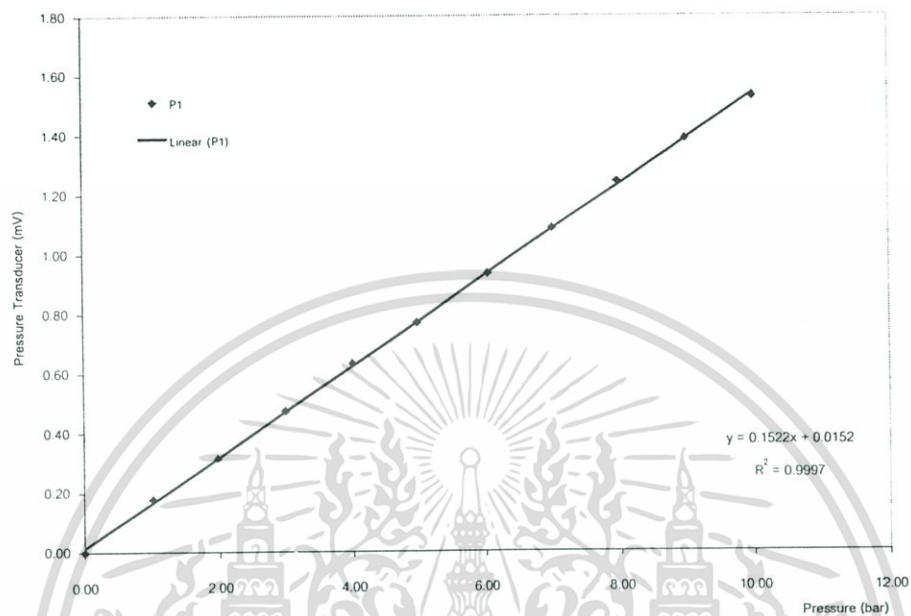


รูปที่ 8 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมย่อย *falpha*

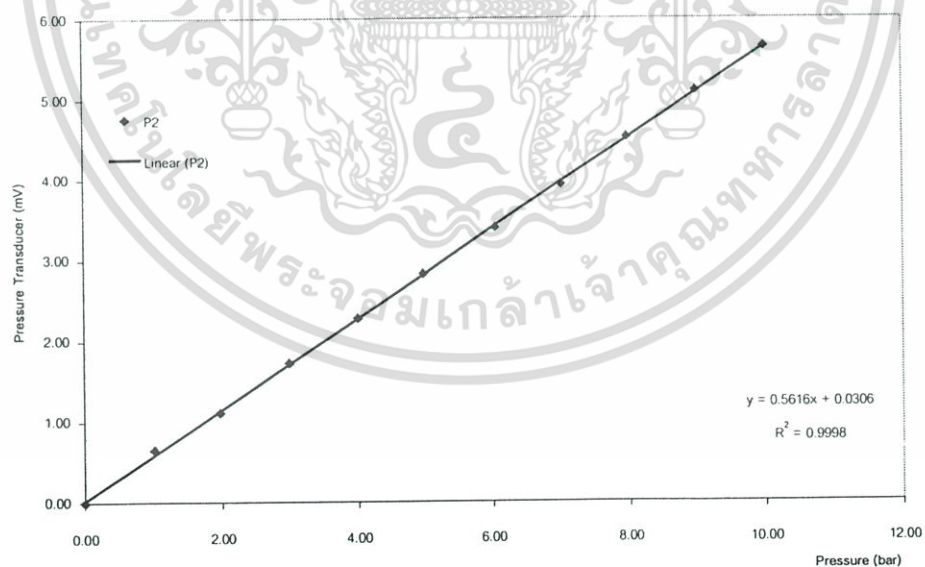
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer

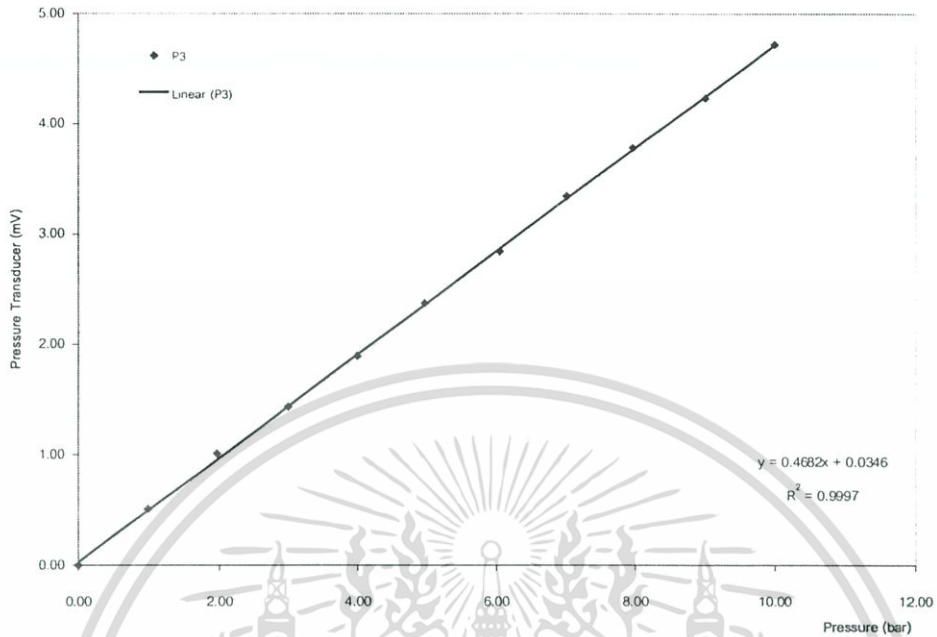


รูปที่ ข. 1 กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer , P1

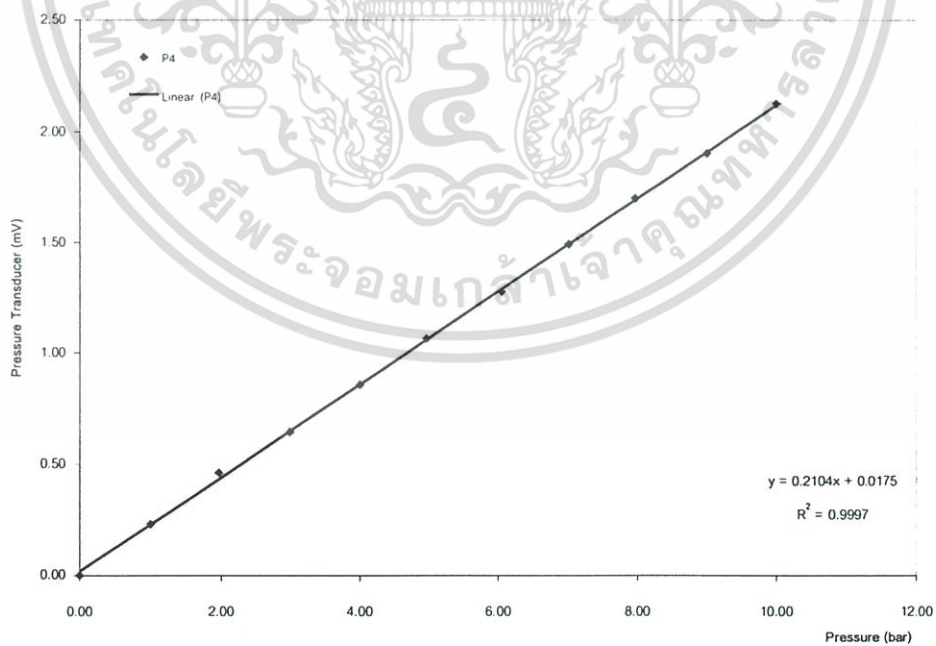


รูปที่ ข. 2 กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer , P2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer , P3

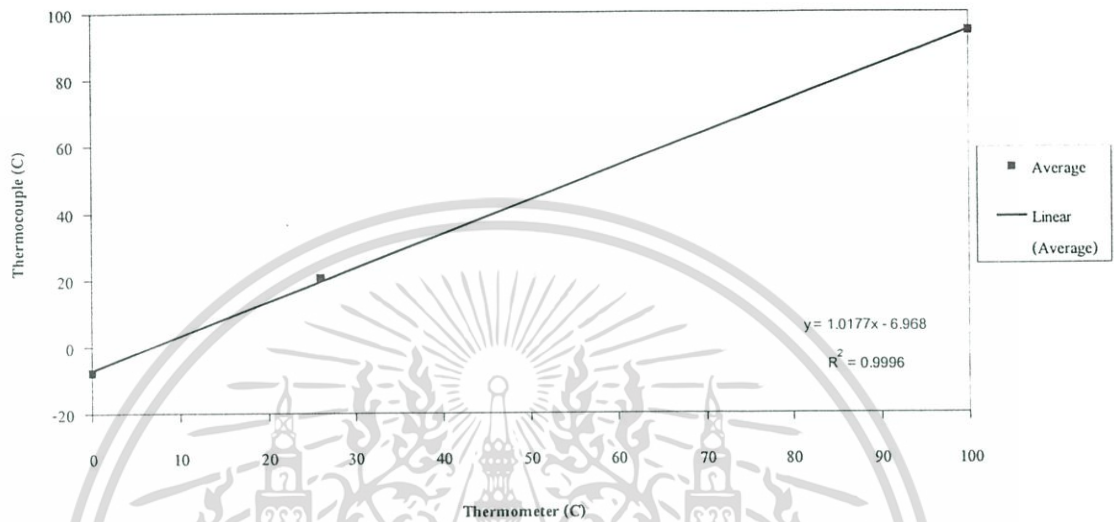


รูปที่ 4 กราฟแสดง Calibration curve ของ Pressure transducer , P4

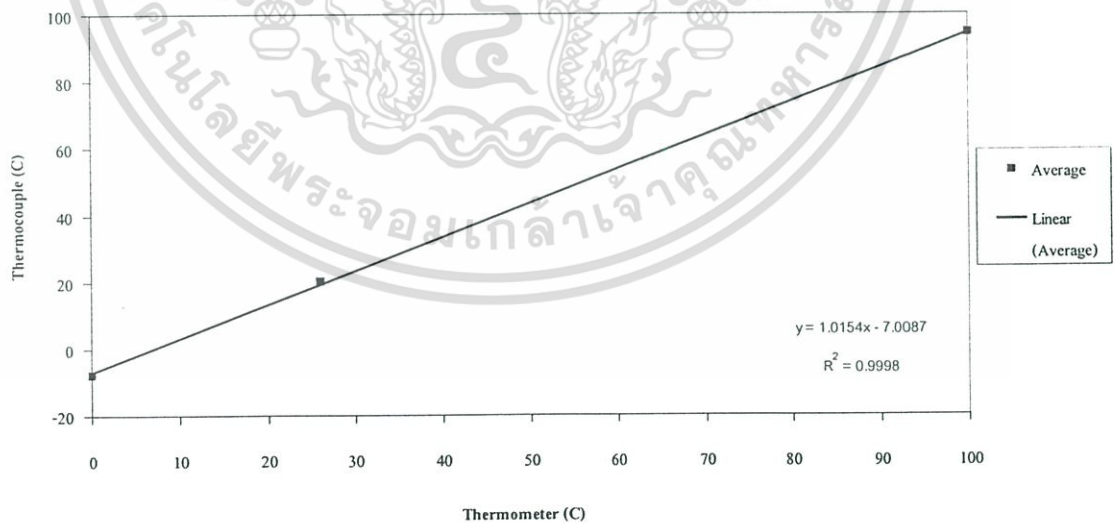
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple

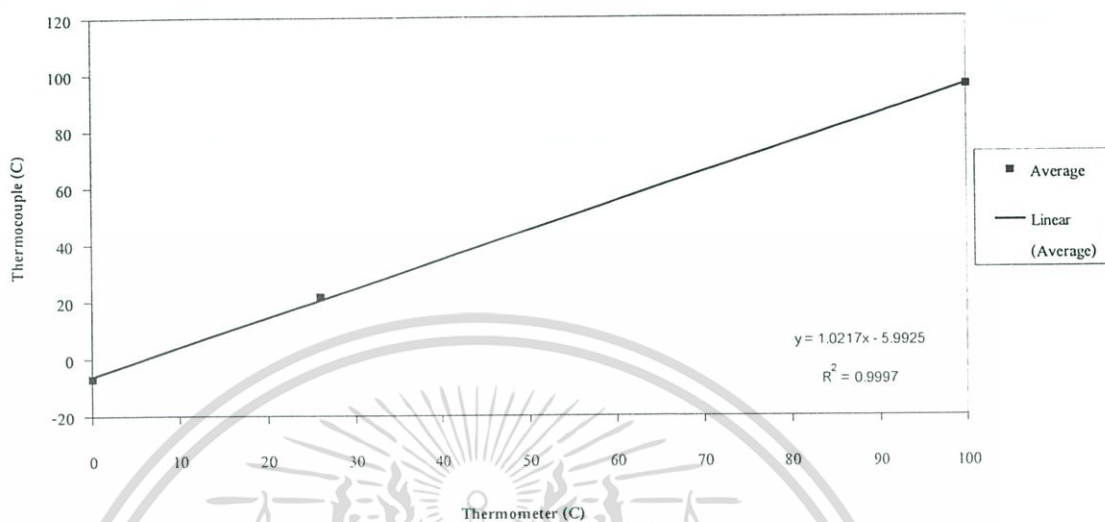


รูปที่ ค. 1 กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T1

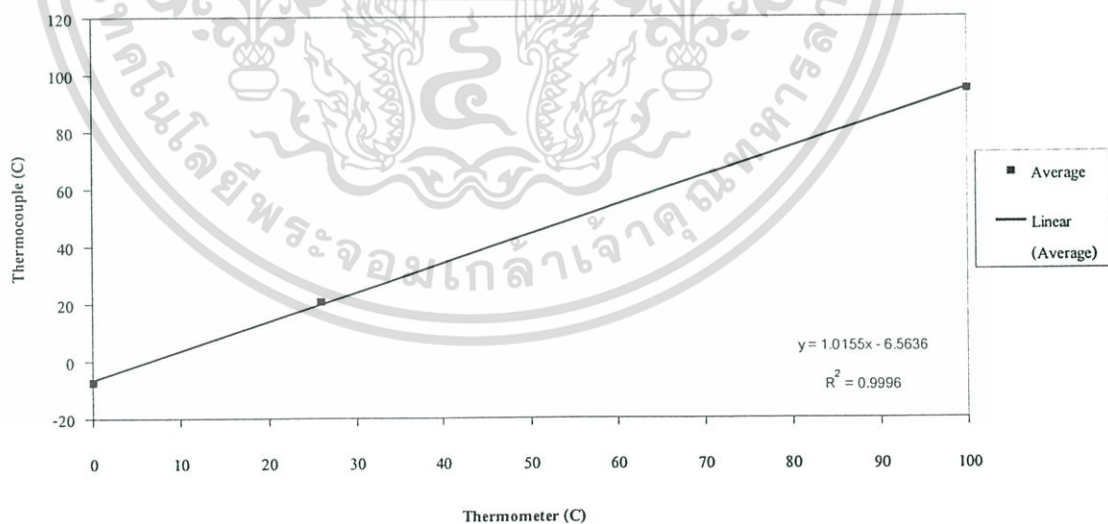


รูปที่ ค. 2 กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

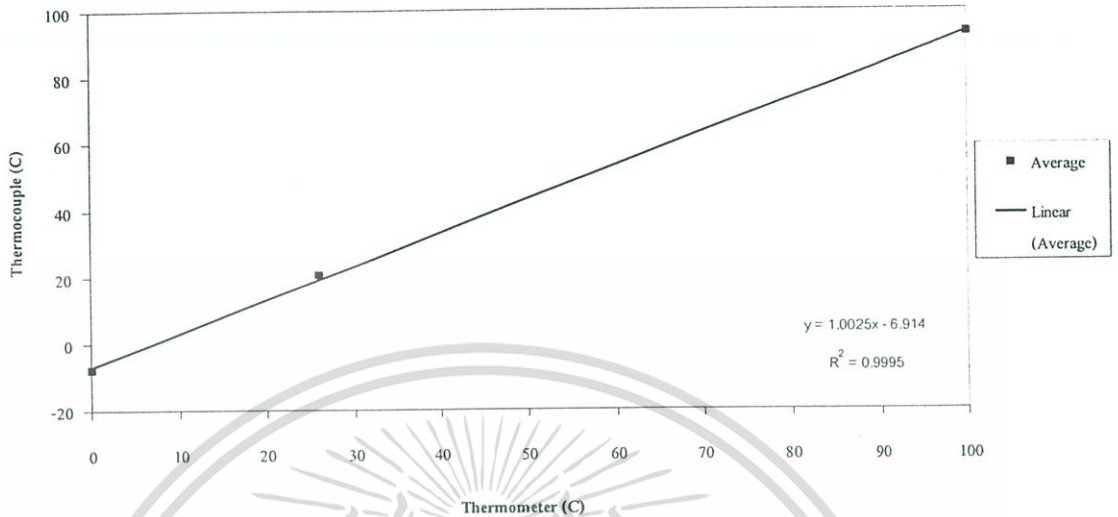


รูปที่ ค. 3 กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T3

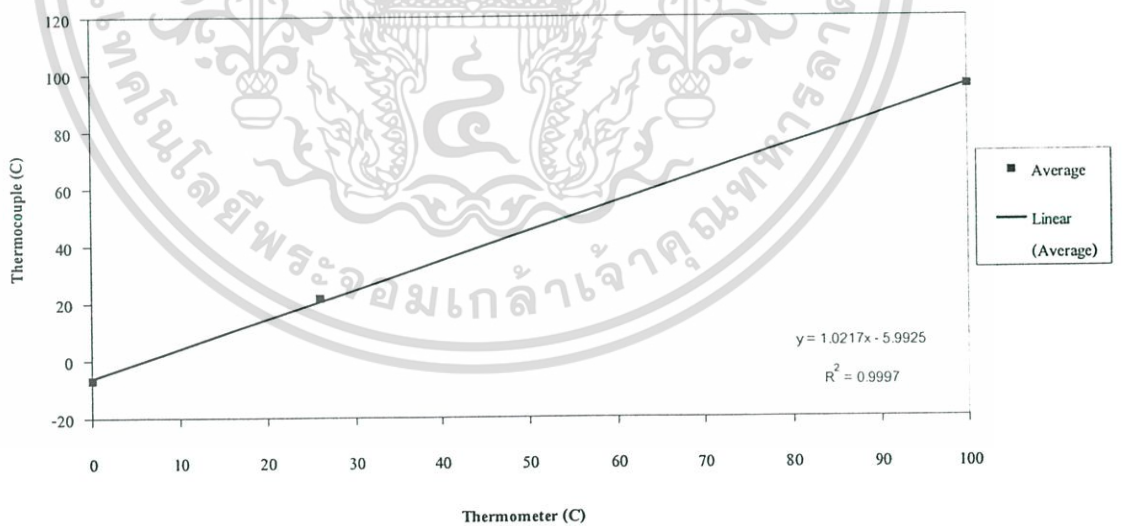


รูปที่ ค. 4 กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค. 5 กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T5

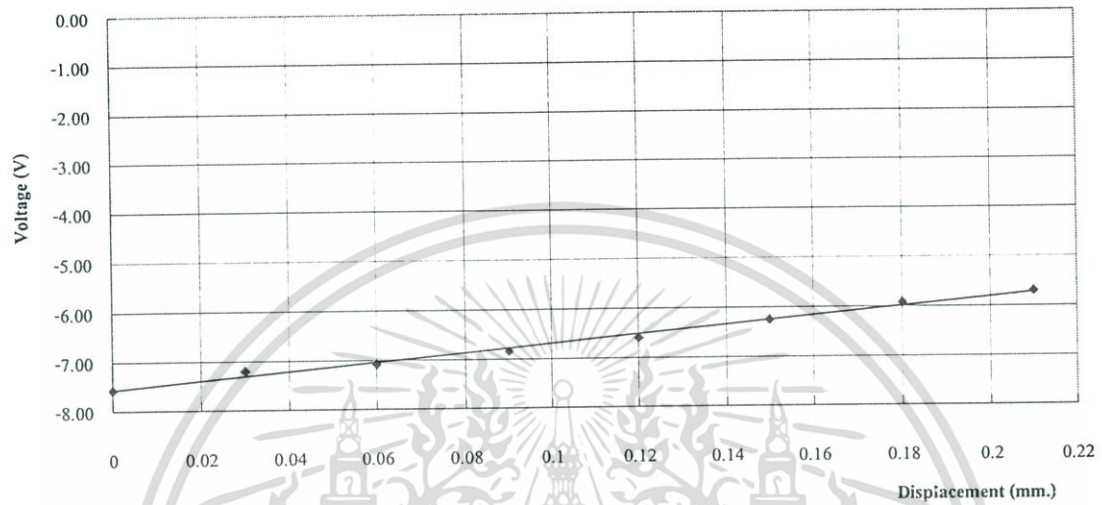


รูปที่ ค. 6 กราฟแสดง Calibration curve ของ Thermocouple , T6

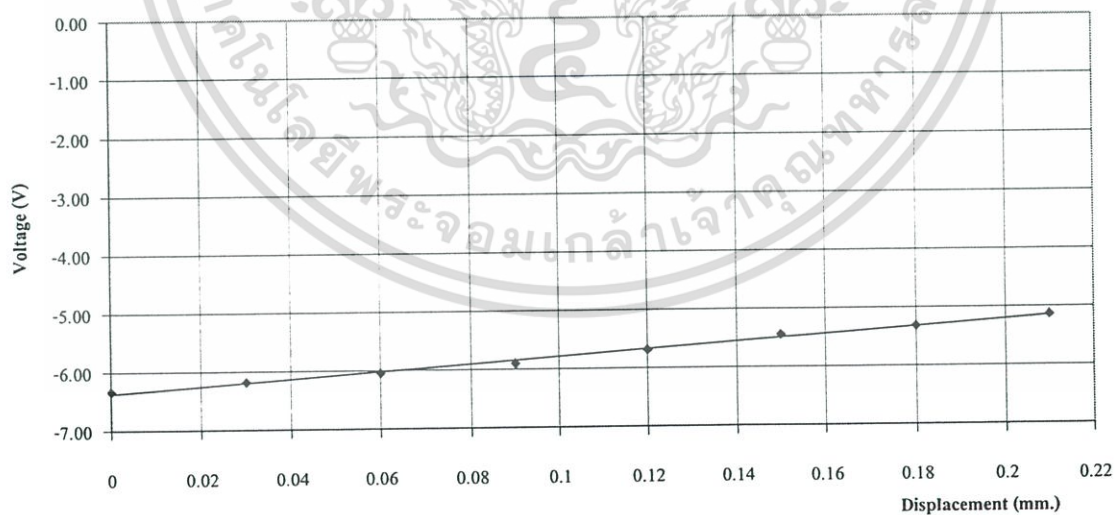
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

กราฟแสดง Calibration curve –ของ Gap Sensor



รูปที่ ง. 1 แสดง Calibration curve ของ Gap Sensor , G1



รูปที่ ง. 2 แสดง Calibration curve ของ Gap Sensor , G2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ
ตารางแสดงคุณสมบัติของน้ำมันพืช

ตารางที่ จ. 1 คุณสมบัติของน้ำมันถั่วเหลือง

คุณสมบัติ	น้ำมันถั่วเหลืองรีไฟน์	น้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 0.2% by mass	น้ำมันถั่วเหลืองผสม ZDTP 1% by mass
ความหนืดสมบูรณ์ μ (Pa. s)			
@25 °C	0.0559	0.0539	0.0537
@40 °C	0.0363	0.0361	0.0348
@60 °C	0.0219	0.0218	0.0213
@80 °C	0.0195	0.0194	0.0192
@100 °C	0.017	0.0169	0.0163
ความหนาแน่น			
ρ (g/cm ³) @40 °C	0.9168	0.9149	0.8767
ρ (g/cm ³) @100 °C	0.8798	0.8523	0.8293
ค่าดัชนีความหนืด	170	165	164
ความหนืดจลน์			
ν (cSt)			
@40 °C	39.59	41.77	41.79
@100 °C	19.322	20.378	20.4
ค่าความร้อนจำเพาะ			
C_p (J/g °C)	1.9994	1.9954	1.9842

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ. 2 คุณสมบัติของน้ำมันปาล์ม

คุณสมบัติ	น้ำมันปาล์มรีไฟน์	น้ำมันปาล์มผสม	น้ำมันปาล์มผสม
		ZDTP 0.2% by mass	ZDTP 1% by mass
ความหนืดสมบูรณ์ μ (Pa. S)			
@25 °C	0.0743	0.0738	0.0727
@40 °C	0.0476	0.0459	0.0438
@60 °C	0.0265	0.0265	0.0257
@80 °C	0.0205	0.0202	0.0198
@100 °C	0.0174	0.0171	0.0168
ความหนาแน่น			
ρ (g/cm ³) @40 °C	0.9293	0.903	0.9027
ρ (g/cm ³) 100 °C	0.882	0.8627	0.8629
ค่าดัชนีความหนืด	166	164	163
ความหนืดจลน์			
ν (cSt)			
@40 °C	47.132	48.521	52.689
@100 °C	19.047	19.821	20.164
ค่าความร้อนจำเพาะ			
C_p (J/g °C)	2.0379	2.0338	2.0130

ตารางที่ จ. 3 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นในปัจจุบัน

คุณสมบัติ	SAE 40	SAE 90
ความหนืดสมบูรณ์		
μ (Pa. S)		
@25 °C	0.345	0.505
@40 °C	0.144	0.204
@60 °C	0.0565	0.0782
@80 °C	0.0253	0.0365
@100 °C	0.0165	0.0203

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงค่าที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าการกระจายแรงดันและอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง ที่อัตราการเชิงศูนย์กลางเท่ากับ 0.2 และที่ความเร็วรอบ 400, 600, 800 rpm.

at $\varepsilon=0.2$	Pressure (Pa.)				Temperature ©					
Speed(rpm.)	P1	P2	P3	P4	T1	T2	T3	T4	T5	T6
400	74828.9	94324.8	76837.7	6322.66	30.1389	30.5159	30.8571	31.6587	32.2024	32.4603
600	106236	135210	109133	7958.05	30.1389	30.5159	30.9722	32.1548	32.8373	33.369
800	139330	168458	114040	10301.7	30.1389	30.8413	31.6429	32.6944	33.7421	34.4762

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าการกระจายแรงดันและอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง ที่อัตราการเชิงศูนย์กลางเท่ากับ 0.4 และที่ความเร็วรอบ 400, 600, 800 rpm.

at $\varepsilon=0.4$	Pressure (Pa.)				Temperature ©					
Speed(rpm.)	P1	P2	P3	P4	T1	T2	T3	T4	T5	T6
400	145318	273394	225903	8048.19	30.1944	30.7024	31.504	32.6111	33.3929	33.7619
600	154525	336092	258830	8811.8	30.2976	30.7698	31.8016	33.8571	34.8452	35.3452
800	186795	431795	339621	11467.1	30.2976	31.1905	32.381	34.8214	35.631	36.3492

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าการกระจายแรงดันและอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันที่ได้จากการทดลอง ที่อัตราการเชิงศูนย์กลางเท่ากับ 0.6 และที่ความเร็วรอบ 400, 600, 800 rpm.

at $\varepsilon=0.6$	Pressure (Pa.)				Temperature ©					
Speed(rpm.)	P1	P2	P3	P4	T1	T2	T3	T4	T5	T6
400	183293	572027	501306	25754.2	30.2341	30.7937	31.873	33.7024	35.2857	35.6706
600	269743	728200	701158	12941.5	30.4365	31.0635	32.5714	34.9524	37.0913	37.623
800	349093	918318	912214	15452.5	30.5595	31.4405	33.2897	36.3135	38.6746	39.2341

ตารางที่ ๓.๔ แสดงค่าการกระจายแรงดันและอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันรูปไร้มิติที่ได้จากการทดลอง ที่อัตราการเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.2 และที่ความเร็วรอบ 400, 600, 800 rpm.

at $\varepsilon=0.2$	Dimensionless Pressure \bar{P}				Dimensionless Temperature \bar{T}					
Speed(rpm.)	P1	P2	P3	P4	T1	T2	T3	T4	T5	T6
400	0.5811	0.7325	0.5967	0.0491	0.0035	0.013	0.0216	0.0418	0.0555	0.062
600	0.55	0.7	0.565	0.0412	0.0035	0.013	0.0245	0.0543	0.0715	0.0849
800	0.541	0.6541	0.4428	0.04	0.0035	0.0212	0.0414	0.0679	0.0943	0.1128

ตารางที่ ๓.๕ แสดงค่าการกระจายแรงดันและอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันรูปไร้มิติที่ได้จากการทดลอง ที่อัตราการเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.4 และที่ความเร็วรอบ 400, 600, 800 rpm.

at $\varepsilon=0.4$	Dimensionless Pressure \bar{P}				Dimensionless Temperature \bar{T}					
Speed(rpm.)	P1	P2	P3	P4	T1	T2	T3	T4	T5	T6
400	1.1285	2.1231	1.7543	0.0625	0.0049	0.0177	0.0379	0.0658	0.0855	0.0948
600	0.8	1.74	1.34	0.04562	0.0075	0.0194	0.0454	0.0972	0.1221	0.1347
800	0.7253	1.6766	1.3187	0.04453	0.0075	0.03	0.06	0.1215	0.1419	0.16

ตารางที่ ๓.๖ แสดงค่าการกระจายแรงดันและอุณหภูมิในฟิล์มน้ำมันรูปไร้มิติที่ได้จากการทดลอง ที่อัตราการเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.6 และที่ความเร็วรอบ 400, 600, 800 rpm.

at $\varepsilon=0.6$	Dimensionless Pressure \bar{P}				Dimensionless Temperature \bar{T}					
Speed(rpm.)	P1	P2	P3	P4	T1	T2	T3	T4	T5	T6
400	1.4234	4.4422	3.893	0.2	0.0059	0.02	0.0472	0.0933	0.1332	0.1429
600	1.3965	3.77	3.63	0.067	0.011	0.0268	0.0648	0.1248	0.1787	0.1921
800	1.35548	3.5657	3.542	0.06	0.0141	0.0363	0.0829	0.1591	0.2186	0.2327

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ที่ ศธ 0513.10801/ ๖๐๖

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

ตู้ ป.ณ. 1032 ไปรษณีย์เกษตรศาสตร์

กรุงเทพมหานคร 10903

25 กุมภาพันธ์ 2548

เรื่อง ตอบรับบทความทางวิชาการ

เรียน นายวรภัทร พุ่งเจริญ

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัยเรื่อง "การออกแบบหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของเบร้งเพลากลมความยาวจำกัดห่อล้นด้วยสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตรเนียนโดยวิธีบรอยเดน-เฟลตเซอร์-โดลด์เฟรบ-ชันโน" เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสาร "วิศวกรรมสาร มก." ดังที่ทราบแล้วนั้น

ฝ่ายบรรณาธิการวารสาร "วิศวกรรมสาร มก." ได้พิจารณาแล้ว เห็นสมควรรับตีพิมพ์บทความวิจัยของท่านลงใน "วิศวกรรมสาร มก." ฉบับที่ 53 ประจำเดือนสิงหาคม – พฤศจิกายน 2547
ต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(รศ.ดร.พีรยุทธ์ ชาญเศรษฐิกุล)

บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมสาร มก.

คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทร. 0-2942-8555 ต่อ 1126

โทรสาร 0-2579-2775

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ในการนำผลผลิตที่ได้จากธรรมชาติมาใช้ในงานอุตสาหกรรมนับว่าเป็นเรื่องน่าสนใจในปัจจุบัน วัตถุประสงค์ที่สามารถหาได้ง่ายและเป็นผลผลิตภายในประเทศทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง และยังช่วยลดมลพิษในคราวเดียวกัน การนำน้ำมันถั่วเหลืองร่วมกับสารเติมแต่งบางชนิด สามารถปรับปรุงให้ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นดีขึ้น การศึกษาถึงพฤติกรรมของการหล่อลื่นเกี่ยวกับความสามารถในการรับภาระและผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นทำให้ทราบว่ามีความเป็นไปได้สูง ในการนำน้ำมันถั่วเหลืองมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหล่อลื่นในอนาคต

สำหรับวิธีการออกแบบเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของแบร์ริงเพลลากรมมีมากมายหลายวิธี ในบทความฉบับนี้ได้นำทฤษฎี บรอยเดน-เฟลตเซอร์-โกลด์เฟรบ-ชันโน ที่ได้ถูกประดิษฐ์เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถคำนวณหาจุดออปติ มั่มได้อย่างรวดเร็วมีความถูกต้องสูง เพราะมีการเทียบค่าที่คำนวณได้กับวิธี Exhaustive Search การออกแบบเพื่อใช้หาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของแบร์ริงเพลลากรมหล่อลื่นด้วยน้ำมันถั่วเหลือง เป็นการออกแบบเพื่อก่อให้เกิดประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุด

2. ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎี บรอยเดน-เฟลตเซอร์-โกลด์เฟรบ-ชันโน

ทฤษฎีการออปติไมเซชันนี้ได้ถูกออกแบบมาให้งานเป็นแบบวนลูป ซึ่งถ้ายังไม่ได้คำตอบในครั้งแรกก็ให้ทำการวนหาต่อไปจนกว่าจะ ได้คำตอบ ซึ่งหลักการนี้เรียกว่าวิธีหาค่าตอบแบบ การทำซ้ำ (Iteration) ส่วนใหญ่วิธีหาค่าตอบแบบนี้ เรามักใช้ร่วมกับการเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ การทำงานของ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าว สามารถอธิบายได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1.1 เริ่มที่ $i = 1$ โดยการกำหนดค่าเริ่มต้น

ต้นของ x^1 , x^2 จากนั้นกำหนด เมตริกซ์ $[B]$ ที่มี

ขนาด 2×2 ให้มีค่าเท่ากับยูนิตเมตริกซ์ในครั้งแรกของการคำนวณ

2.1.2 คำนวณหาค่า Search Direction S

ซึ่งมีค่าเท่ากับ $S = -[B] \cdot \nabla f$

2.1.3 คำนวณหาค่า Optimal Step Length

α ในทิศทางของ S เพื่อคำนวณหาค่า X ออกมา โดยที่ $X^{i+1} = X^i + \alpha S^i$

2.1.4 ทดสอบจุด X^{i+1} , ถ้า $|\nabla f| \leq \text{Stop}$

Error หมายถึงจุด X^{i+1} เป็นจุดที่ทำให้ฟังก์ชันมีค่าต่ำที่สุด แต่ถ้ายังไม่เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวให้ไปทำในขั้นตอนต่อไป

2.1.5 ปรับปรุงค่า Hessian Matrix เป็น

$$[B_{i+1}] = [B_i] + \left(1 + \frac{g_i^T [B_i] g_i}{d_i^T g_i} \right) \frac{d_i d_i^T}{d_i^T g_i} - \left(\frac{d_i g_i^T [B_i]}{d_i^T g_i} \right) \begin{pmatrix} [B_i] g_i d_i^T \\ d_i^T g_i \end{pmatrix}$$

$$\text{โดยที่ } \begin{aligned} d_i &= X_{i+1} - X_i \\ g_i &= \nabla f_{i+1} - \nabla f_i \end{aligned}$$

2.1.6 การคำนวณครั้งต่อไป ให้ไปเริ่มต้น

ที่ข้อ 1.1.1 โดยที่ $i = i+1$

2.2 คุณสมบัติของน้ำมันถั่วเหลือง

ในการศึกษาน้ำมันถั่วเหลืองบริสุทธิ์ได้ถูกผสมกับสารเติมแต่งไดเอสเตอร์ 3% โพลีไอโซบิวทีลีน 4% และ 0.02% ซิลิโคน โดยน้ำหนัก คุณสมบัติการไหลของสารหล่อลื่นได้จากการทดลองโดยใช้อุปกรณ์ Rotational Rheometer ตามมาตรฐาน DIN 53019

น้ำมันถั่วเหลืองมีพฤติกรรมเป็นนอนนิวโตเนียนแบบ dilatant ($n > 1$) โดยกฎพาวเวอร์ลอว์ที่ได้จาก Jiin-Yuh Jang and Chong-Ching Chang สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tau = m \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^{n-1} \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

$$m = m_0 \exp[-\beta(T - T_0)] \quad (2)$$

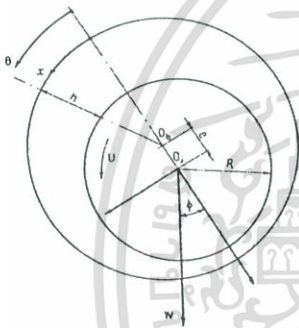
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ m เป็นค่าคงที่ของน้ำมันที่อุณหภูมิ T ; m_o เป็นค่าคงที่ที่ทางเข้าของน้ำมันที่อุณหภูมิ T_o ; n คือดัชนีการไหล (viscometric constant) และ β คือดัชนีความหนืดเชิงอุณหภูมิ (viscosity temperature index).

Density, $\rho = 905.7 \text{ kg/m}^3$
Specific heat, $C_p = 1914 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
Viscosity consistency at T_o , $m_o = 0.02857 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Viscometric constant, $n = 1.088$
Viscosity temperature index, $\beta = 0.0395 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Inlet oil temperature, $T_o = 38 \text{ }^\circ\text{C}$
Ambient pressure, $P_o = 1 \text{ atm}$

ตารางที่ 1. คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

2.3 สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์



รูปที่ 1. ลักษณะแบริ่งเพลลากรวม

สมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์รูปไว้มิติได้เขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\bar{h}^{n+2}}{nm} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} + \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right] + \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\bar{h}^{n+2}}{m} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \xi} \right] = 6 \left(\frac{u}{c} \right)^{n-1} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \theta} \quad (3)$$

ค่าความหนาฟิล์มน้ำมันรูปไว้มิติเขียนได้เป็น

$$\bar{h} = 1 + \varepsilon \cos \theta \quad (4)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบสมการ โมดิฟายด์เรย์โนลด์ดังต่อไปนี้

$$\bar{P}(0, \xi) = \bar{P}(\theta, \xi) = \bar{P}(\theta, -\xi) = 0 \quad (5)$$

$$\bar{P}(\theta, \xi) \geq 0 \quad (6)$$

2.4 สมการพลังงาน

จากสมการพลังงาน

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (7)$$

สมการพลังงานรูปไว้มิติสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$A \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial \theta} \right) + B \frac{D}{L} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial \xi} \right) = \alpha \frac{\bar{m}}{h^{n+1}} (E + F) \quad (8)$$

โดยที่ $\bar{T} = \beta(T - T_o) \quad (9)$

$$A = \frac{1}{2} - \frac{1}{12} \left[\frac{\bar{h}^{n+1}}{nm\sigma} \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) \right] \quad (10)$$

$$B = -\frac{1}{12} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \left[\frac{\bar{h}^{n+1}}{nm\sigma} \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \xi} \right) \right] \quad (11)$$

$$E = \int_0^1 \left[1 - \frac{1}{2} \frac{\bar{h}^{n+1}}{nm\sigma} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} (1-2\eta) \right]^{n+1} d\eta \quad (12)$$

$$F = \int_0^1 \left[1 - \frac{1}{2} \frac{\bar{h}^{n+1}}{nm\sigma} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} (1-2\eta) \right]^{n+1} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{D}{L} \right) \left(\frac{\bar{h}^{n+1}}{m\sigma} \right) \frac{\partial \bar{P}}{\partial \xi} (1-2\eta) \right]^2 d\eta \quad (13)$$

ตัวเลขการกระจาย Dissipation Number

$$\alpha = \frac{(2\pi N)^n m_o \beta \left(\frac{r}{c} \right)^{n+1}}{\rho C_p} \quad (14)$$

N คือความเร็วรอบ ใช้ที่ 1000 rpm.

เงื่อนไขขอบของสมการพลังงาน:

$$\bar{T}(0, \xi) = 0 \quad (15)$$

$$\bar{T}(\theta, \xi) = \bar{T}(\theta, -\xi) \quad (16)$$

สมการและเทอมรูปไว้มิติทั้งหมดได้จาก Jiin-

Yuh Jang and Chong-Ching Chang

สมการรูปไว้มิติของส่วนประกอบภาระ

ในแนวรัศมีและตั้งฉากกับรัศมี \bar{W}_ε และ \bar{W}_ϕ ได้จากการอินทิเกรตแรงดันในฟิล์มน้ำมันดังนี้

$$\bar{W}_\varepsilon = - \int_0^{1.2\pi} \int_0^1 \bar{P} \cos \theta \, d\theta \, d\xi \quad (17)$$

$$\bar{W}_\phi = \int_0^{1.2\pi} \int_0^1 \bar{P} \sin \theta \, d\theta \, d\xi \quad (18)$$

โดยที่ ภาวะ \bar{W} รูปไร้มิติ และมุมแอตติจูด

$$\bar{W} = \sqrt{\bar{W}_c^2 + \bar{W}_\phi^2}, \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{\bar{W}_\phi}{\bar{W}_c}\right) \quad (19)$$

การอินทิเกรตค่าความเค้นเฉือนตามแนวเส้นรอบวงของแบร์ริง ได้แรงเสียดทาน และค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานรูปไร้มิติตามลำดับ

$$\bar{F} = \sigma \int_0^1 \int_0^{2\pi} \frac{\bar{m}}{\bar{h}^n} \left(1 + \frac{\bar{h}^{n+1}}{2mn\sigma} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta}\right)^n d\theta d\xi \quad (20)$$

$$f_{\text{coefficient}} = \frac{\bar{F}}{\bar{W}} \quad (21)$$

3. การออปติไมเซชัน (Optimization)

3.1 อัตราการไหลและผลต่างอุณหภูมิ

จากกฎการอนุรักษ์มวล อัตราการไหลของมวลเข้าไปปริมาตรควบคุม (Control Volume) มีค่าเท่ากับอัตราการไหลออกของมวล เมื่อปริมาตรควบคุมไม่มีการสะสมของมวล จากสมการที่ (3) ค่าอัตราการไหลรูปไร้มิติสามารถหาได้ดังนี้ อัตราการไหลรูปไร้มิติตามแนวแกน θ ,

$$\bar{Q}_\theta = -\frac{1}{12} \frac{\bar{h}^{n+2}}{nm} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \left(\frac{c}{r}\right)^n + \left(\frac{2\pi V}{60}\right)^{n-1} \left(\frac{c}{r}\right) \left(\frac{\bar{h}}{2}\right) \quad (22)$$

อัตราการไหลรูปไร้มิติตามแนวแกน ξ ,

$$\bar{Q}_\xi = -\frac{1}{12} \frac{\bar{h}^{n+2}}{m} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \xi} \left(\frac{c}{r}\right)^n \left(\frac{d}{l}\right)^2 \quad (23)$$

เนื่องจากการไหลเป็นแบบ 2 มิติ ตามแกน θ และแกน ξ ดังนั้นที่หน้าตัดใดๆของปริมาตรควบคุมที่ตั้งฉากกับแกน θ จะได้ว่า อัตราการไหลเข้าไปปริมาตรควบคุม \bar{Q} เท่ากับอัตราการไหลออกตามแกน θ บวกกับอัตราการไหลออกทั้งสองข้างตามแกน ξ ดังต่อไปนี้

$$\bar{Q} = \bar{Q}_\theta + 2\bar{Q}_\xi \quad (24)$$

ผลต่างอุณหภูมิ,

$$\Delta \bar{T} = \bar{T}_{\max} - \bar{T}_{\text{average}} \quad (25)$$

เมื่อ \bar{T}_{\max} , \bar{T}_{average} เป็นค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยตามลำดับ

3.2 สมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขบังคับสมการวัตถุประสงค์

$$f_{\text{objective}} = w_1 \bar{Q} + w_2 \Delta \bar{T} \quad (26)$$

โดยที่ \bar{Q} , $\Delta \bar{T}$ และ $f_{\text{objective}}$ อยู่ในรูปอัตราส่วน c/r และ d/l ตามสมการที่ (8), (22) และ (23)

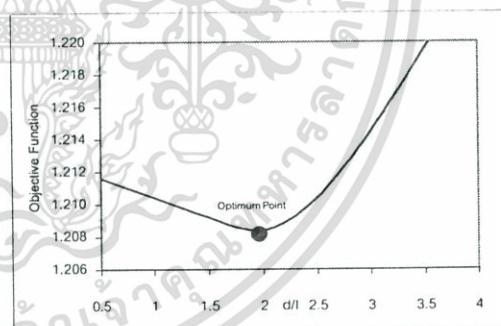
ฟังก์ชันน้ำหนัก (Weight Function) :

$$w_1 = 124 \\ w_2 = 0.205$$

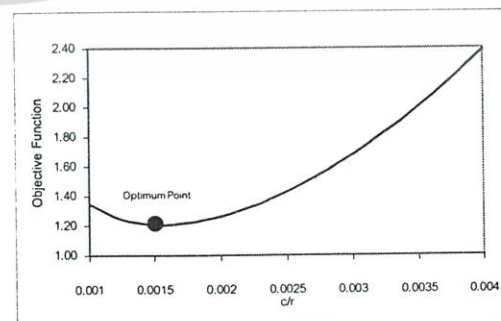
ทฤษฎีแบร์ริงเพลทกลมความยาวจำกัดมีอัตราส่วนความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของเพลตต่อความยาวของกบารองสั้นอยู่ในช่วง $0.25 \leq d/l \leq 2.0$ โดยมีสมการเงื่อนไขบังคับ:

$$0.001 \leq c/r \leq 0.004 \\ 0.25 \leq d/l \leq 2.0 \quad (27)$$

4. ผลการคำนวณเชิงตัวเลข

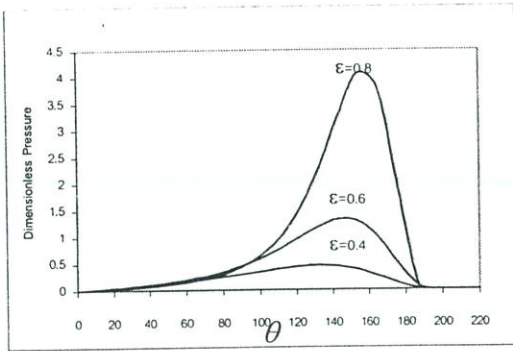


รูปที่ 2. สมการวัตถุประสงค์เทียบกับ d/l

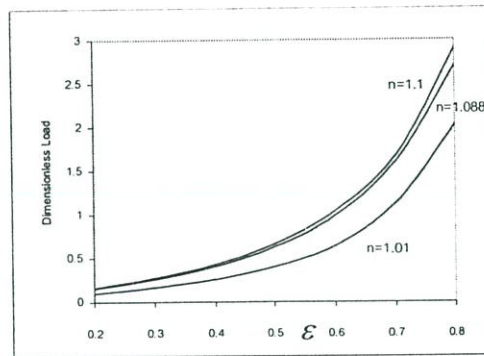


รูปที่ 3. สมการวัตถุประสงค์เทียบกับ c/r

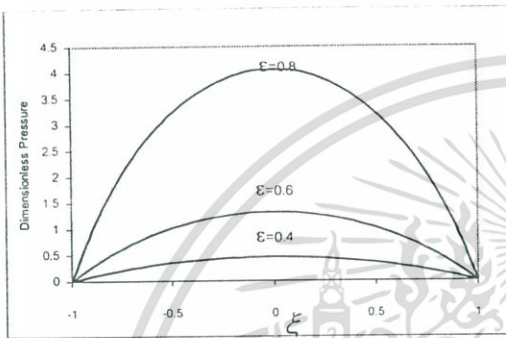
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



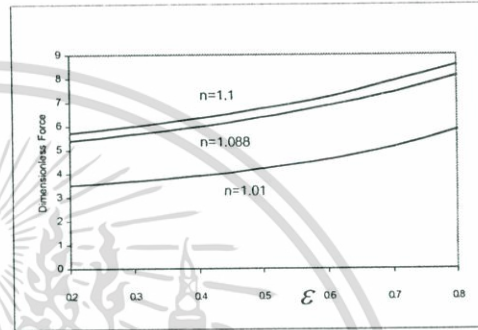
รูปที่ 4 การกระจายแรงดันตามแกน θ



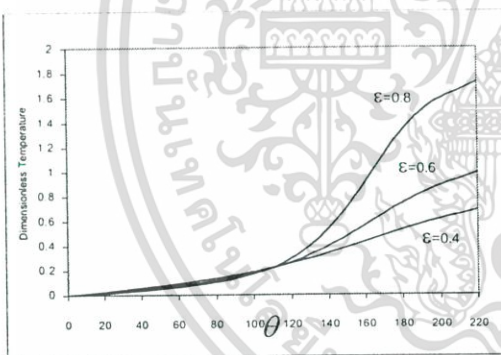
รูปที่ 8 ภาวะ \bar{W} เทียบกับอัตราการเชิงศูนย์ ϵ



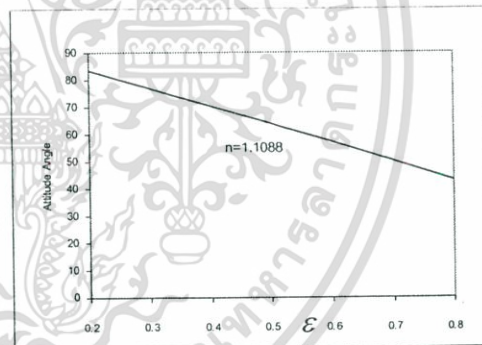
รูปที่ 5 การกระจายแรงดันตามแกน ξ



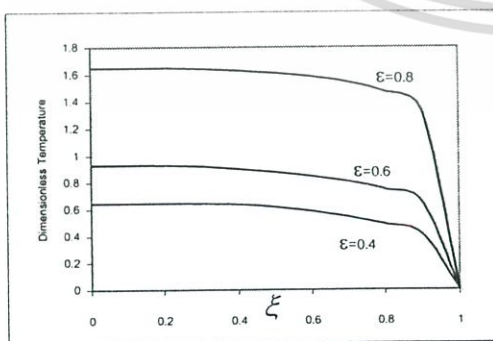
รูปที่ 9 แรงเสียดทาน \bar{F} เทียบกับอัตราการเชิงศูนย์ ϵ



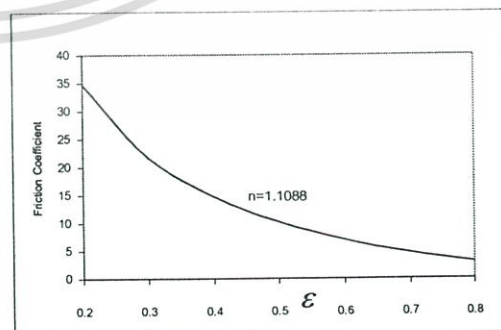
รูปที่ 6 การกระจายอุณหภูมิตามแกน θ



รูปที่ 10 มุมเอ็ดจุด ϕ เทียบกับอัตราการเชิงศูนย์ ϵ



รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิตามแกน ξ



รูปที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์เสียดทาน $f_{coefficient}$ เทียบกับอัตราการเชิงศูนย์ ϵ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการโมดิไฟด์เรย์โนลด์รูปไร้มิติ (3) และสมการพลังงานรูปไร้มิติ (8) ถูกคำนวณเชิงตัวเลขไปพร้อมๆกันโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทรน โดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference) ร่วมกับการทำ Overrelaxation และ Underrelaxation โดยใช้ค่าตัวประกอบ 1.4 และ 0.9 ในสมการ (3) และสมการ (8) ตามลำดับ

สมการวัตถุประสงค์ (Objective Function) เป็นส่วนประกอบระหว่างผลของอัตราการไหลและผลต่างอุณหภูมิเนื่องจากอัตราการไหลและผลต่างอุณหภูมิอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติของอัตราส่วนเคลียร์เรนซ์ต่อรัศมีของเพลลา c/r และอัตราส่วนความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของเพลลาต่อความยาวของกาบร่องคลื่น d/l สำหรับฟังก์ชันน้ำหนัก (Weight Function) w_1 , w_2 ได้ถูกใช้เพื่อการออกแบบขนาดที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากอัตราการไหลมีค่าน้อยกว่าผลต่างของอุณหภูมิก่อนข้างมาก ดังนั้นพิจารณาให้ค่าอัตราการไหลคงด้วย $w_1=124$ และผลต่างของอุณหภูมิก่อนด้วย $w_2=0.205$ เพื่อให้ค่าอัตราการไหลและค่าผลต่างของอุณหภูมิอยู่ในช่วงการออกแบบเดียวกัน นำสมการวัตถุประสงค์ (26) ไปคำนวณเชิงตัวเลขโดยวิธี BFGS เพื่อหาขนาดที่ทำให้ค่าอัตราการไหลและผลต่างอุณหภูมิต่ำที่สุด ที่อัตราการเยื้องศูนย์กลาง $\varepsilon=0.6$ ได้ค่าอัตราส่วนเคลียร์เรนซ์ต่อรัศมีของเพลลา $c/r=0.0015$ และอัตราส่วนของความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของเพลลาต่อความยาวของกาบร่องคลื่น $d/l=2.0$ ที่ให้สมการวัตถุประสงค์มีค่าต่ำที่สุด $f_{objective}=1.208$ ดังรูปที่ 2. และรูปที่ 3. หมายถึงเป็นจุดที่ทำให้ค่าอัตราการไหลและผลต่างอุณหภูมิต่ำที่สุด

จากรูปที่ 4. และ รูปที่ 5. แสดงการกระจายแรงดันในแนวแกน θ และ ξ รูปที่ 6. รูปที่ 7. แสดงการกระจายอุณหภูมิในแนวแกน θ และ ξ ตามลำดับ ที่ค่า $\varepsilon=0.4$, ที่จุดออปติ멈 $\varepsilon=0.6$ และ $\varepsilon=0.8$ ซึ่งทำให้ทราบว่า ถ้าค่าอัตราการเยื้อง

ศูนย์กลาง ε มีค่าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าการกระจายแรงดันและอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น

จากรูปที่ 8. – รูปที่ 9. แสดงพฤติกรรมสถิตย์ของแบริงเพลากลม (Static characteristics) ดังนี้ ภาวะ \overline{W} , แรงเสียดทาน \overline{F} ที่ค่าดัชนีการไหล $n=1.1$, ที่จุดออปติ멈 $n=1.088$ และ $n=1.01$ เทียบกับอัตราการเยื้องศูนย์กลาง ε ทำให้ทราบเช่นเดียวกันเมื่อค่าดัชนีการไหล n มีค่าเพิ่มขึ้น ภาวะ \overline{W} , แรงเสียดทาน \overline{F} ก็มีค่ามากขึ้น

สำหรับในส่วนของมุมเอตติจูด ϕ เทียบกับอัตราการเยื้องศูนย์กลาง ε และค่าสัมประสิทธิ์เสียดทาน $f_{coefficient}$ เทียบกับอัตราการเยื้องศูนย์กลาง ε ที่จุดออปติ멈 สามารถทราบได้ ดังรูปที่ 10. และรูปที่ 11. ตามลำดับ

5.สรุปผล

จากการศึกษาการออกแบบที่เหมาะสมของแบริงเพลากลมความยาวจำกัดหล่อลิ้นด้วยน้ำมันพืช ในบทความฉบับนี้ทำให้ทราบว่า

1. น้ำมันพืชที่นำมาศึกษาคือน้ำมันถั่วเหลืองซึ่งเป็นสารหล่อลิ้นอน-นิวโตเนียน แบบ dilatant ที่มีค่าดัชนีการไหล $n=1.088$ มีศักยภาพในการหล่อลิ้นสามารถสร้างแรงดันในฟิล์มน้ำมันเพื่อรับภาระที่มากกระทำต่อแบริงได้ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4. และรูปที่ 5. ค่าแรงดันไร้มิติในฟิล์มน้ำมันมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 6.5

2. การออกแบบโดยการออปติไมเซชันด้วยวิธี บรอยเดน-เฟลตเซอร์-โกลด์เฟรบ-ชันโน ร่วมกับการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทรนสามารถคำนวณจุดออปติ멈ได้อย่างรวดเร็วจากการศึกษาในบทความฉบับนี้ ได้ค่า $c/r=0.0015$ และ $d/l=2.0$ เป็นจุดที่แบริงเพลากลมความยาวจำกัดมีขนาดเหมาะสมที่สุด

3. ได้ศึกษาพฤติกรรมสถิตย์ (Static characteristics) ของแบริงเพลากลมความยาวจำกัด ซึ่งค่าภาวะ \overline{W} , แรงเสียดทาน \overline{F} , มุมเอตติจูด ϕ

และค่าสัมประสิทธิ์เสียดทาน $f_{coefficient}$ เทียบกับ อัตราการเยื้องศูนย์ ε สามารถแสดงได้ ตามรูปที่ 4 - รูปที่ 11

4. การศึกษาการออกแบบแบร็งเพลากลม ความยาวจำกัดหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืช ทำให้ทราบ ขนาดของแบร็งเพลากลมความยาวจำกัดที่อัตรา ส่วนของเคลียร์เรนซ์ต่อรัศมีของเพล $c/r=0.0015$ และอัตราส่วนความยาวเส้นรอบวงของเพลต่อ ความยาวของกบรอลื่น $d/l=2.0$ ก่อให้เกิดอัตรา การสิ้นเปลืองน้ำมันหล่อลื่นต่ำ และในทางเดียวกัน ก็ทำให้ผลต่างอุณหภูมิที่เกิดขึ้นน้อย ซึ่งหมายถึงการ ยืดอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น

5. การศึกษาเพื่อพัฒนานำเอน้ำมันพืชซึ่ง เป็นผลผลิตที่ได้จากธรรมชาติภายในประเทศมาใช้ ก่อให้เกิดประโยชน์ ในงานอุตสาหกรรมการหล่อ ลื่น ทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิต เป็นสาร หล่อลื่นที่ไม่มีมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

6. เอกสารอ้างอิง

M.Mongkolwongroj, Ch. Aiumpornsin “Static And Dynamic Characteristics Of Journal Bearings with Non-Newtonian Palm-Based Oils”, Int. J. of Applied Mechanics and Engineering, Vol.8 pp79-86, 2003.

Hsu Y.C. “Non-newtonian Flow in Infinite Length Full Journal Bearing”, ASME Trans., Journal of Lubrication Technology , pp. 329-333, 1967.

Jiin-Yuh Jang and Chong-Ching Chang “Adiabatic Analysis of Finite Width Journal Bearings with Non-newtonian Lubricants”, Wear., Vol. 122 pp.63-75, 1988.

Horowitz, H.H., Steindler F.E.,

“Calculated Performance of Non-Newtonian Lubricants in Finite Width Journal Bearings”, ASLE Trans., Vol.4, pp.275-281, 1961.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix A: Nomenclature

c	ความเร็วแสง	μ	ค่าความหนืด
C_p	ค่าความร้อนจำเพาะ	μ_r	ค่าความหนืดอ้างอิง
d	เส้นผ่านศูนย์กลางหลอด	ξ	$z/(l/2)$
e	ค่าเยื้องศูนย์กลาง	σ	ค่าคงที่ไร้มิติ, $\left(\frac{U}{c}\right)^{n-1}$
\bar{F}	แรงเสียดทานรูปไร้มิติ	ϕ	มุมแอตติจูด
h	ความหนาฟิล์มน้ำมัน		
\bar{h}	ความหนาฟิล์มน้ำมันแบบไร้มิติ, h/c		
l	ความยาวทาบร่องลื่น		
m	ค่าคงที่ความหนืดของอุณหภูมิ		
m_0	ค่าคงที่ความหนืดของอุณหภูมิที่ T_0		
\bar{m}	ค่าคงที่ความหนืดของอุณหภูมิ, $\bar{m} = \frac{m}{m_0}$		
n	ดัชนีการไหล		
N	ความเร็วรอบ		
P	แรงดัน		
P_0	แรงดันที่บรรยากาศ		
\bar{P}	แรงดันรูปไร้มิติ, $\frac{P - P_0}{2N\pi\mu_r(r/c)^2}$		
\bar{Q}	อัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นรูปไร้มิติ		
r	รัศมีของหลอด		
T	อุณหภูมิ		
T_0	อุณหภูมิที่ทางเข้าน้ำมันหล่อลื่น		
\bar{T}	อุณหภูมิรูปไร้มิติ, $\beta(T - T_0)$		
\bar{W}	ภาระที่แบริงรับ		
U	ความเร็วเชิงเส้นของแบริง, $2\pi rN$		
x	แกนในแนวเส้นรอบวงของแบริง		
y	แกนในแนวตั้งฉากกับฟิล์มน้ำมัน		
z	แกนในแนวแกนของแบริง		
β	ดัชนีความหนืดเชิงอุณหภูมิ		
ε	อัตราการเยื้องศูนย์กลาง, $\frac{e}{c}$		
η	y/h		
θ	มุมตามแนวเส้นรอบวง, $\frac{x}{r}$		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน นายวรภัทร พุ่งเจริญ
 วัน เดือน ปีเกิด 13 พฤศจิกายน 2515
 วุฒิกการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2539

ประสบการณ์การทำงาน

2541: THANTHIYA CO.,LTD.
 2547: ENSR (THAILAND) CO.,LTD.

ผลงานที่เคยได้รับการตีพิมพ์

- 2545: “EXPERIMENTAL STUDY ON JOURNAL BEARING WITH SOYBEAN-BASED OILS”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16
- 2547: “การออกแบบหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของแบริ่งเพลตกลมความยาวจำกัดหล่อด้วยสารหล่อลื่นแบบนอน-นิวโตรเนียน โดยวิธี บรอยเดน-เฟลตเซอร์-โกลด์เฟรบ-ชันโน”, วารสารวิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้